



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JANNE KELAVUORI  
BIOMETAANIN TUOTANTO JA KÄYTTÖ SUOMESSA  
Diplomityö

Tarkastaja: professori Jukka Kontti-  
nen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Luonnontieteiden tiedekuntaneuvos-  
ton kokouksessa 26.4.2017

## TIIVISTELMÄ

**Janne Kelavuori:** Biometaanin tuotanto ja käyttö Suomessa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 90 sivua, 17 liitesivua

Toukokuu 2017

Ympäristö- ja energiatekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Voimalaitos- ja polttotekniikka

Tarkastaja: professori Jukka Konttinen

**Avainsanat:** biometaani, liikennepolttoaine, biopolttoaine, kaasutus, hiilineutraali, metanointi, synteetikaasu, metaani, adsorptio, kiertotalous, vety, anaerobinen hajoaminen, moottori, polttokenno

Tässä diplomityössä tutkitaan biokaasun ja sen jalostetun version, biometaanin, tuotantoa ja käyttöä Suomessa. Tarkastelu toteutetaan perehtymällä kirjallisuustutkimuksissa esitettyihin biokaasun ja biometaanin tuotantomenetelmiin, tämän hetkisiin tutkimuskohteisiin sekä muihin sovelluksiin Suomessa ja muualla maailmassa, ja verrataan niiden käytettävyyttä Suomen olosuhteissa. Työssä tutkitaan erilaisten, ei vielä Suomessa käytössä olevien biometaanin tuotantomenetelmien soveltuvuutta Suomalaiseen toimintaympäristöön. Työn tarkoitus on selvittää tuotetun biometaanin arvoketjua, ja taloudellisesti ja ympäristöllisesti järkevintä käyttökohdetta.

Biometaanin tuotannolla ja käytöllä voidaan saavuttaa merkittäviä hiilidioksidipäästöjen leikkauksia, koska tuotettu kaasu korvaa pääasiallisesti täysin fossiilisia polttoaineita. Biokaasun ja biometaanin tuotantohinnat ovat anaerobisista lähteistä tuotettaessa kilpailukykyisiä fossiilisten öljypolttoaineiden kanssa, tuotantohintojen ollessa 22-40 €/MWh biokaasulle ja 58-84 €/MWh biometaanille. Synteettisen biometaanin tuotanto puubiomassasta ei ole vielä teknisesti täysin kypsä, eikä taloudellisesti kilpailukykyinen vaihtoehto maakaasulle, tuotantohinnan ollessa 49-58 €/MWh Suomen energiapuun hinnoilla. Suomessa on kuitenkin merkittävää potentiaalia tuottaa biometaanin niin peltobiomasoista, energiapuusta kuin mustalipeästä. Biometaanin voidaan käyttää vähentämään fossiilisia polttoaineita niin lämmön- ja sähköntuotannosta kuin myös liikennepolttoaineista.

Biometaani soveltuu myös energian varastointivälineeksi. Uusiutuvasta lähteestä tuotettu sähköenergia voidaan konversioprosessin avulla muuntaa vedyksi ja edelleen biometaaniksi, jota voidaan varastoida ja käyttää haluttuna ajankohtana. Sähkön hinnan näiden konversion ja käyttöajanhetkien välillä tulee nousta noin nelinkertaiseksi, mikäli biometaani hyödynnetään CHP-sovelluksessa. Tuulivoimalla tuotettua sähköä on taloudellisesti mahdollista muuntaa biometaaniksi Suomessa tietyissä olosuhteissa. PtG-sovelluksessa Suomalaisessa ympäristössä tuotetun biometaanin hinta on noin 73-93 €/MWh.

## ABSTRACT

**Janne Kelavuori:** Production and use of Biomethane in Finland

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 90 pages, 17 Appendix pages

May 2017

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Engineering

Major: Power plants and combustion

Examiner: Professor Jukka Konttinen

**Keywords:** biomethane, transportation fuel, biofuel, gasification, carbon neutral, methanation, syngas, methane, adsorption, hydrogen, anaerobic digestion, engine, fuel cell

This thesis studies the production and use of biogas and upgraded biogas, biomethane, in Finland. Study is conducted by reviewing literature research done in the field, focusing on the biogas and biomethane production technologies, current area of study and other applications of biomethane production and distribution. Results are compared to current biomethane production methods in Finland and elsewhere in the world. The goal of this thesis is to clarify the value chain of biomethane production in terms of economics and environmental value.

By using biomethane it is possible to accomplish significant carbon dioxide emission reductions, because usually biomethane replaces fossil fuels. Production costs for anaerobically produced biogas and biomethane in Finland are competitive against oil fuels, 22-40 €/MWh for biogas and 58-84 €/MWh for biomethane. Production of synthetic natural gas via biomass gasification is not yet economically viable without subsidies in Finland, with production costs ranging between 49-58 €/MWh. Wood residues, energy crops and black liquor possess significant potential for biomethane and synthetic natural gas production in Finland, and the product gas could be used to produce heat, electricity or transportation fuel.

Biomethane is also a medium for energy storage. Electricity produced from a renewable source can be converted into hydrogen and further into biomethane that can be stored and used at a more opportune time. Price of electricity between the conversion and use of biomethane must quadruple if the biomethane is used in an CHP-application in Finnish economic environment. Electricity produced by wind power is economically viable to convert into hydrogen in Finland in certain circumstances. Production cost of biomethane produced in a Power-to-gas process is between 73-93 €/MWh.

## ALKUSANAT

Idea tämän työn tekemiseen syntyi ollessani harjoittelijana Luonnonvarakeskuksen Sotkamon toimipisteen biokaasulaitoksella kesällä 2016. Opin käytännön kautta säilörehusyötteeseen perustuvan biokaasulaitoksen toiminnan ja siihen liittyvät suureet sekä näin tyypillisen, biokaasua hyödyntävän toimintaympäristön. On eri asia ajaa itse traktorilla nurmipaaleja reaktoriin kuin lukea loputtomia tutkimusartikkeleita. Pääsin myös tekemään kirjallisuustutkimusta sekä työskentelemään laboratoriossa, joista saadun kokemuksen avulla luotiin vankka pohja tämän työn kirjoittamiselle.

Haluan kiittää Sotkamon toimipisteen henkilökuntaa perehdyttämisestäni biokaasualaan, Tampereen teknillisen yliopiston henkilökuntaa vuosien varrella saamastani hyvästä opetuksesta sekä läheisiäni saamastani kannustuksesta opintojeni aikana. Kiitokset myös työn ohjaajalle Jukka Konttiselle joustavasta ja hyvin sujuneesta diplomityöprojektista.

Tampereella 17.5.2017,

Janne Kelavuori

# SISÄLLYSLUETTELO

LYHENTEET JA MERKINNÄT .....	VI
1. JOHDANTO .....	1
2. BIOKAASUN TUOTANTO .....	3
2.1 Biokaasun tuotannossa käytetyt syötteen .....	3
2.1.1 Lietteet, biojätteet ja kaatopaikkakaasut .....	4
2.1.2 Energiakasvit .....	7
2.2 Biokaasun muodostuminen ja käsittelyjäännös .....	7
2.2.1 Anaerobinen hajoaminen ja sen hallinta .....	9
2.2.2 Käsittelyjäännöksen hyödyntäminen .....	12
2.3 Biokaasun tuotantoprosessit .....	13
2.3.1 Jatkuva toiminen märkäprosessi .....	14
2.3.2 Jatkuva toiminen kuivaprosessi .....	16
2.3.3 Panostoiminen kuivaprosessi .....	17
2.4 Biokaasun puhdistus ja jalostus biometaaniksi .....	18
2.4.1 Puhdistus .....	19
2.4.2 Jalostus biometaaniksi .....	20
2.5 Hiilineutraalius ja päästöt biokaasun tuotannossa .....	22
3. SYNTEETTISEN BIOMETEENIN TUOTANTO .....	24
3.1 Synteesikaasun tuotanto .....	25
3.1.1 Kaasutuksen termodynamiikka ja reaktiokinetiikka .....	26
3.1.2 Tuotantoon käytetyt syötteen .....	29
3.1.3 Yleiset kaasutusprosessit .....	31
3.1.4 Biomassan kaasutus .....	34
3.1.5 Synteesikaasun puhdistus ja reformointi .....	35
3.2 Synteesikaasun konversio biometaaniksi .....	37
3.2.1 Metanointi .....	37
3.2.2 Biometeenin tuotantoprosessi .....	39
3.3 Tuotannon liittäminen muihin teollisiin prosesseihin .....	41
3.3.1 Sellun valmistus .....	41
4. BIOMETEENIN TUOTANTO MUISTA LÄHTEISTÄ .....	44
4.1 Tuulibiometaani ja energian varastointi .....	45
4.2 Elektrolyysin hyödyntäminen bio- ja synteesikaasun jalostuksessa .....	46
5. BIOMETEENIN KÄYTTÖ JA VARASTOINTI .....	48
5.1 Voimalaitosympäristö .....	49
5.1.1 Kombivoimalaitos .....	50
5.1.2 Lämpökattila .....	51
5.2 Liikennekäyttö ja kaasuautoilun markkinatilanne Suomessa .....	52
5.3 Hajautettu sähköntuotanto .....	54
5.3.1 Polttomoottori .....	54
5.3.2 Polttokenno .....	55

5.4	Biometaanin varastointi & jakelu.....	56
5.4.1	CBG .....	57
5.4.2	ABG .....	58
5.4.3	LBG.....	59
5.4.4	Bio- ja maakaasuputkistot.....	60
6.	LASKENNALLISET MENETELMÄT .....	62
6.1	Case 1 – Säilörehusta liikennepolttoaineeksi kahdessa eri skenaariossa .....	62
6.1.1	Skenaario 1 .....	64
6.1.2	Skenaario 2.....	66
6.2	Case 2 – Synteettisen biometaanin tuotanto Suomen markkinoilla .....	69
6.2.1	Biomassan kaasutus ja metanointi .....	69
6.2.2	Mustalipeän kaasutus ja metanointi .....	72
6.3	Case 3 – Biometaanin varastointi- ja kuljetusteknologioiden vaikutus käyttöön .....	73
6.4	Case 4 – Biometaani uusiutuvista lähteistä sekä energian varastointivälineenä .....	77
6.4.1	Vedyn tuotanto tuulivoiman avulla sekä konversio biometaaniksi .....	78
6.4.2	Biometaani ja PtG-sovellus.....	82
7.	YHTEENVETO .....	83
	LÄHTEET.....	86
	LIITELUETTELO:	

LIITE 1: Biokaasun puhdistukseen ja jalostukseen käytetyt kaupalliset menetelmät

LIITE 2: Kaasutusprosessien raaka-aineet sekä siitä saatavat lopputuotteet

LIITE 3: VTT:n tekemä tutkimus synteetikaasun koostumuksesta eri olosuhteissa

LIITE 4: VTT:n synteetikaasun ja puhtaan polttokaasun tutkimus -hankkeessa käytetty prosessi

LIITE 5: Biomass-to-Gas Bio2G -hankkeen biometaanin tuotannon prosessikaavio

LIITE 6: GoBiGas-hankkeen 2. vaiheen suunniteltu prosessikaavio

LIITE 7: Tampereen Lielahden kombivoimalaitoksen  $\Phi P$ -karakteristika

LIITE 8: Kaasun puristustehontarve eri puristussuhteilla

LIITE 9: Case 1: Säilörehusta liikennepolttoaineeksi -osion laskenta

LIITE 10: Case 2: Synteettisen biometaanin tuotanto Suomessa -osion laskenta

LIITE 11: Case 3: Biometaanin varastointi- ja kuljetusteknologioiden vaikutus käyttöön -osion laskenta

LIITE 12: Case 4: Biometaani uusiutuvista lähteistä sekä energian varastointivälineenä -osion laskenta

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

ABG	Adsorbed BioGas, kiinteään väliaineeseen adsorptoitu biometaani.
BMP	Biochemical methane potential, raaka-aineen metaanintuottopotentiaali.
CBG	Compressed BioGas, paineistettu biometaani.
CGE	Cold Gas Efficiency, kuvaa kaasuttimen energiatehokkuutta.
CHP	Combined heat and power, sähkön ja lämmön yhteistuotanto.
CNG	Compressed natural gas, paineistettu maakaasu
Fischer-Tropsch	Kemiallinen reaktio, jossa synteetikaasua muunnetaan nestemäisiksi hiilivedyiksi.
GWh	Gigawattitunti
HRT	Hydraulic Retention Time, prosessin viipymäaika. Määritetään reaktorin tilavuuden ja syötteen tilavuusvirran suhteesta.
kWh	Kilowattitunti
LBG	Liquefied BioGas, nesteytetty biometaani.
LNG	Liquefied natural gas, nesteytetty maakaasu
MWh	Megawattitunti
NTP	Normal temperature and pressure, normaalilämpötila ja paine, 293,15 K ja 101,325 kPa.
OLR	Organic Loading Rate, reaktorin orgaaninen kuormitus. Kuvaa biokaasureaktoriin syötettyä orgaanisen aineen massavirtaa reaktorin toimintatilavuutta kohti.
PSA	Pressure Swing Adsorption, biokaasun jalostukseen käytetty adsorption perustuva tekniikka.
PtG	Power-to-Gas, teknologia jolla sähköenergia varastoidaan kemiallisena energiana
Sabatier-reaktio	Vedyn ja hiilidioksidin kemiallinen reaktio, jossa syntyy metaania ja vettä
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell, kiinteäoksidinen polttokenno.
TS	Total Solids, Kuiva-ainepitoisuus kokonaismassaan nähden
TWh	Terawattitunti
VFA	Volatile Fatty Acids, anaerobisessa hajoamisessa syntyvä välituote.
VS	Volatile Solids, orgaanisen aineen osuus kiintoaineesta
ΦP-karakteristika	Lämmön- ja sähköntuotannon jakaumakaavio kombivoimalaitoksessa.
$C_p$	Tuuliturbiinin roottorin hyötysuhde
$V_g$	Tuotetun synteetikaasun tilavuus käytettyä polttoainekiloa kohti, [Nm <sup>3</sup> /kg]
$K_p$	Tasapainovakio
$q$	Kaasun lämpöarvo, joko ylempi tai alempi, [MJ/Nm <sup>3</sup> ]

# 1. JOHDANTO

Fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen on tärkeässä asemassa taistelussa ilmastomuutosta vastaan. Suomen tapauksessa fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen näkyy ennen kaikkea polttoaineiden tuonnin vähentymisenä. Liikenne- ja viestintäministeriön työryhmän esityksen mukaan Suomessa vuonna 2050 henkilöautoliikenne olisi suurimmaksi osaksi riippumatonta öljyn tuonnista, sekä 70% raskaan liikenteen polttoainetarpeesta katettaisiin biopolttoaineilla. Maatalous- ja ympäristöministeri Kimmo Tiilikainen arvioi keväällä 2017, että Suomesta on mahdollista tulla hiilineutraali vuoteen 2045 mennessä [59].

Biokaasuteknologia mahdollistaa uusiutuvan energiantuotannon kotimaisista raaka-aineista, ravinteiden kierrätyksen sekä edistää materiaalien kierrätystä. Teknologia sopii eri käyttötarkoituksiin sekä mittaluokkiin käyttötarpeen mukaan, aina biohajoavien jätteiden käsittelystä kaatopaikkajätteiden sekä metsäteollisuuden sivutuotteiden hyödyntämiseen. Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan biokaasun tuotantoa ja jalostusta biometaaniksi anaerobisen hajoamisen sekä biomassan kaasutuksen avulla. Biometaanin arvoketjun loppupään tarkastelulla pyritään selvittämään biometaanin kaupalliset käyttökohteet, tuotannon kustannukset, eri tuotantoteknologioiden väliset kaupalliset sekä teknologiset erot sekä kilpailukyky verrattuna muihin polttoaineisiin liikenne-, energiantuotanto- sekä teollisuussektoreilla.

Energian tuotanto ja kulutus vaihtelevat aina tarpeen mukaan. Fossiilisten polttoaineiden helppo käyttö, varastoitavuus sekä niiden ympärille rakennettu suuri infrastruktuuri asettavat haasteita uusiutuvien biopolttoaineiden käyttöön siirtymiselle. Työssä pyritään tarkastelemaan, että kuinka biometaanin tuotantomenetelmät saadaan vastaamaan käytännön käyttötarpeita verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin, esimerkiksi biometaanin jalostus- ja tankkausasemien suunnittelussa sekä kaasun jakelussa ja varastoinnissa. Tarkastelussa huomioidaan myös hajautetut ja keskitetyt tuotantomenetelmät sekä erilaiset raaka-ainesyötteet. Työssä tutkitaan myös biometaanin soveltuvuutta energian varastointivälineeksi.

Biokaasuteknologian etuna on sen liitettävyyys muihin prosesseihin. Lisäarvoa tuotannolle tuo hiilen sekä ravinteiden kiertotalous, joka on tärkeässä roolissa esimerkiksi maatalomittakaavan biokaasutuotannolle. Tuotettu biometaanin on kemiallisilta ominaisuuksiltaan erinomainen polttoaine ja se soveltuu käytettäväksi monissa tällä hetkellä fossiilista öljyä tai maakaasua hyödyntävissä sovelluksissa sellaisenaan tai pienten muutosten avulla. Työssä keskitytään kiinteisiin raaka-aineisiin, puuperäiseen biomassaan, mustalipeään sekä säilörehuun, koska niiden saatavuus Suomessa on hyvä sekä niitä voidaan soveltaa



moneen eri tuotantoasteeseen. Näitä syötteitä on myös saatavilla muista käyttökohteista ja prosesseista, kuten sellu- ja sahateollisuudesta sekä maataloudesta. Biokaasuteknologian yhteensovitus muiden prosessien kanssa on oleellinen osa kannattavuutta.

Suomessa biokaasun tuotanto on keskittynyt biohajoavien jätteiden ja lietteiden hyödyntämiseen esimerkiksi kaatopaikoilla, jätevedenpuhdistamoilla ja maataloudessa. Tuotetulla kaasulla on katettu näiden prosessien omaa energiantarvetta. Biokaasua on ryhdytty jalostamaan suuremmissa määrin liikennebiometaaniksi viimeisen kymmenen vuoden aikana. Investoinnit uusiutuviin liikennepolttoaineisiin ovatkin todella tärkeässä roolissa kohti hiilineutraalia Suomea, koska sähkö- ja lämmöntuotanto voidaan toteuttaa uusiutuvilla tai hiilineutraaleilla menetelmillä helpommin kuin liikennepolttoainesektori.

Työssä tarkastellaan biokaasun ja biometaanin tuotantomenetelmiä ja arvioidaan niiden toteutettavuutta Suomen olosuhteissa. Biometaanin tuotanto rajataan kolmeen eri menetelmään: anaerobisen hajoamisen avulla tuotetun biokaasun jalostus biometaaniksi, synteettisen biometaanin tuotanto perustuen termiseen biomassan kaasutukseen sekä vedyn konversio biometaaniksi Sabatier-reaktorin avulla. Työn laskentaosiossa määritetään eri menetelmin tuotetulle biometaanille tuotantohinnat Suomalaisessa ympäristössä sekä esitetään tiettyjä biometaanin tuotantoon liittyviä tunnuslukuja.

## 2. BIOKAASUN TUOTANTO

Viitteitä biokaasun käytöstä maataloilla on jo vuosilta 3000 – 1600 ennen ajanlaskun alkua, jolloin sitä käytettiin valaistukseen sekä keittiökäyttöön. Paineistusteknologian kehittyessä 1930-luvulla kaasua ryhdyttiin käyttämään myös liikennekäytössä korvaamaan liikennebensiniä. Suomessa biokaasun tuotanto alkoi Helsingin Raja- sekä Kyläsaaren vedenpuhdistamoilla samoihin aikoihin, ja jatkosodan aikana kyseistä kaasua käytettiin liikennepolttoaineena. 2000-luvulle tultaessa biokaasun tuotanto Suomessa liittyi suurimmaksi osaksi kaatopaikkakaasuihin sekä jätevedenpuhdistamoiden lietteisiin. [30,31]

Biokaasulla tarkoitetaan kaasuseosta, joka sisältää noin 50-75% metaania, 25-50% hiilidioksidia sekä pieniä määriä muita yhdisteitä kuten rikkivetyä, typpeä sekä vettä. Sitä syntyy, kun orgaaninen biomassa, syöte, hajoaa anaerobisesti. Anaerobiseen hajoamiseen perustuvassa prosessissa syötteenä kelpaa lähes kaikki muut biomassat, paitsi korkean ligniinipitoisuuden omaava puu. Anaerobisen hajoamisen seurauksena syötteenä olleesta orgaanisesta hiilestä noin puolet hajoaa muodostaen biokaasua, loppuosan jäädessä niin sanottuun mädätysjäännökseen. Tämä jäännös sisältää paljon arvokkaita ravinteita, ja soveltuu hyvin jatkokäyttöön lannoitteena. Anaerobiseen hajoamiseen perustuvalla prosessilla tuotettu biokaasu voidaan jalostaa lähelle maakaasun kemiallista koostumusta, jolloin se soveltuu liikennepolttoaineeksi sekä siirtoon maakaasuverkkoa pitkin.

Tässä kappaleessa tarkastellaan biokaasun tuotannossa käytettyjä syötteitä, tuotantoprosesseja sekä biokaasun jalostusta biometaaniksi. Syötteiden ja prosessien soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin arvioidaan teknisen käytettävyyden sekä kaupallisten laskelmien kautta. Prosessilaitteiden investointikustannuksia sekä laitosten käyttökustannuksia mallinnetaan jo olemassa olevien tuotantolaitoksien pohjalta. Energiakasveja käyttävien prosessien hiilineutraaliutta ja ympäristövaikutuksia pyritään tarkastelemaan koko tuotanto- ja loppukäyttökettujen ajalta.

### 2.1 Biokaasun tuotannossa käytetyt syötteet

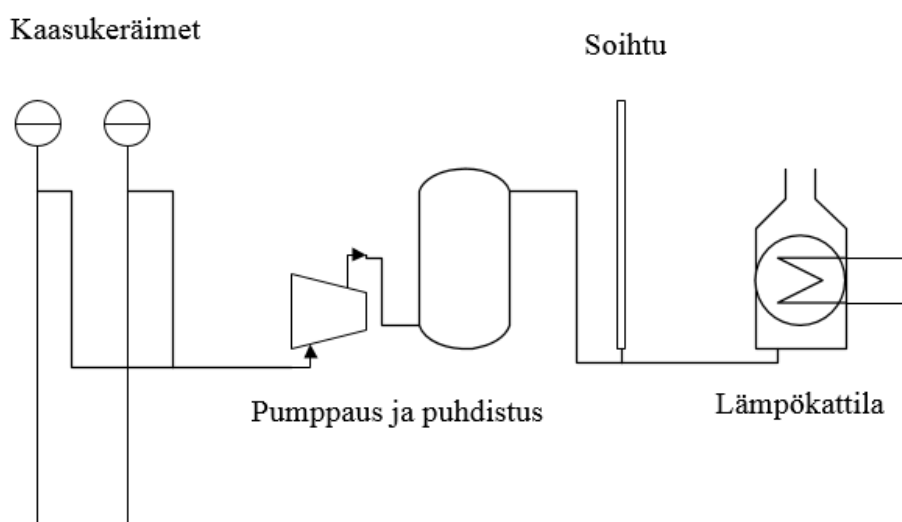
Biokaasun tuotantoprosessissa käytetty syöte määräytyy yleensä tuottajan oman tarpeen tai saatavuuden mukaan. Syötteitä hankitaan oman toiminnan ulkopuolelta harvoin tai vähän, koska laitos yleensä mitoitetaan kattamaan oma energiantarve tai maksimoimaan tuotanto syötteen saatavuuden perusteella. Ulkopuoliset olosuhteet, kuten ilmasto, tuotantopaikka sekä anaerobinen hajoamisprosessi, voivat myös määrätä reunaehdoja sopiville syötteille. Tiettyt syötteet vaativat myös esikäsittelyä.

Syötteillä on myös erilaisia ominaisuuksia liittyen biokaasun tuottoon. Soveltuvuutta voidaan arvioida esimerkiksi metaanintuottopotentiaalin, kuiva-ainepitoisuuden, hiili-typin suhteen tai ravinnekoostumuksen perusteella. Tämän työn laskentaosiossa keskitytään

energiakasviin, nurmeen, koska sen ominaisuudet soveltuvat hyvin muuttuviin energiantuotannon tarpeisiin jopa tuntitasolla asti. Peltobiomassoilla on myös suuri potentiaali Suomessa, tuotannon maksimin ollessa 7-8 TWh vuodessa. Tämä vastaa energiasisällöltään noin 43%:a Suomessa vuonna 2016 käytetystä liikennebensiinistä. Peltobiomassa kasvaa noin 20-30 MWh vuodessa hehtaarilla, noin kolme kertaa enemmän kuin puubiomassa vastaavalla pinta-alalla. [4,28,33]

### 2.1.1 Lietteet, biojätteet ja kaatopaikkakaasut

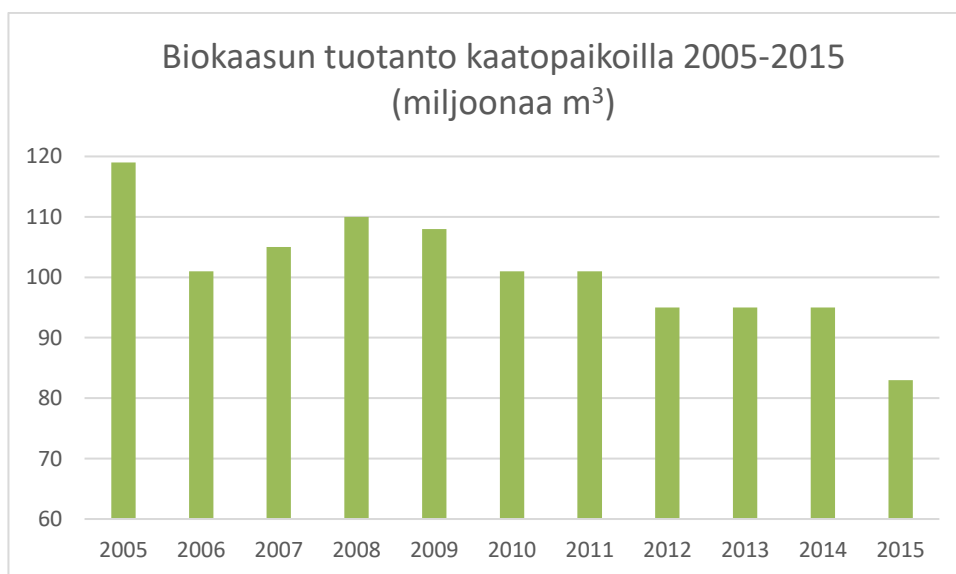
2000-luvulla Suomessa suurin biokaasun tuotanto on keskittynyt kaatopaikoilla kerättävään kaatopaikkakaasuun, jota syntyy kaatopaikoille tuodun jätteessä olevan orgaanisen aineen anaerobisessa hajoamisessa. Kaasu kerätään talteen kuvassa 2-1 esitettyjen jätemassojen sisään sijoitettujen kaasukuilujen avulla. Kerätty kaasu pumpataan edelleen eteenpäin loppukäyttöpisteelle, jossa se voidaan hyödyntää joko lämpökattilassa tai sähköntuotannossa. Suurin osa biokaasusta käytettiin lämmön tuotantoon, ja osalla kaatopaikoista oli myös yhdistettyä sähkön- ja lämmöntuotantoa. [23]



**Kuva 2-1.** Kaatopaikkakaasun keräys ja käyttö. [23]

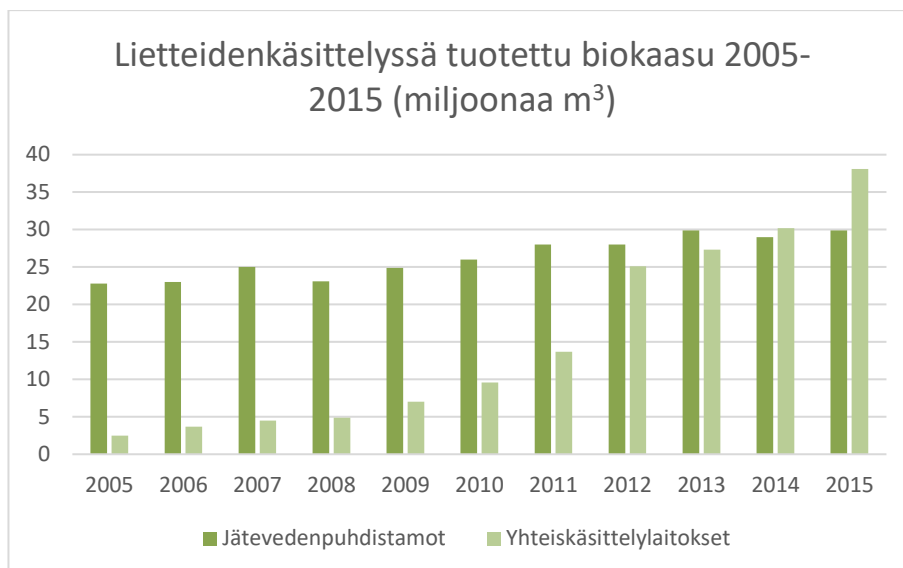
Suomen biokaasutuotannosta vuonna 2015 noin 54% tuotettiin kaatopaikoilla. Kaatopaikkakaasutuotot ovat kuitenkin olleet laskussa viimeisen kymmenen vuoden aikana, koska kaasua kerätään nopeammin kuin uutta kaasua kerkeää muodostua uusien jätteiden hajotessa kaatopaikoilla. On arvioitu, että Suomen kaatopaikoilta voitaisiin kerätä noin 200 miljoonaa kuutiota biokaasua vuodessa, joka vastaisi noin 700 GWh hyödynnettävää kemiallista energiamäärää. Huomioitavaa on, että kaatopaikkakaasussa metaanipitoisuus vaihtelee selkeästi enemmän sekä on pienempi kuin muissa biokaasun tuotantomenetelmissä. Tuotannolla maksimikapasiteetista tällä hetkellä kerätään noin 40%, 85 miljoonaa kuutiota. [23]

Kaatopaikoilla muodostuva metaani on voimakas kasvihuonekaasu, ja sellaisenaan se vapautuu suoraan ympäristöön, joten sen talteenotto on järkevää myös ympäristön kannalta. Mikäli kerättyä biokaasua ei voida hyödyntää energiantuotannossa, sen soihutpolttaminen tai suodattaminen on ympäristön kannalta aina parempi vaihtoehto. EY:n kaatopaikkadirektiivi 1999/31/EY rajoitti kaatopaikalle sijoitettavan biohajoavan yhdyskuntajätteen vuoden 2016 alusta alkaen korkeintaan 25 prosenttiin arvioidusta kokonaismäärästä. Tulevaisuudessa biojätteet tullaan hyödyntämään muualla, esimerkiksi yhteiskäytössä lietteiden mädätyksen yhteydessä, joka tulee myös näkymään kaatopaikkalaitosten tuotannon laskuna ja lopulta loppumisena. Kuvassa 2-2 kuvataan Suomen kaatopaikkakaasun tuotantoa. [23]



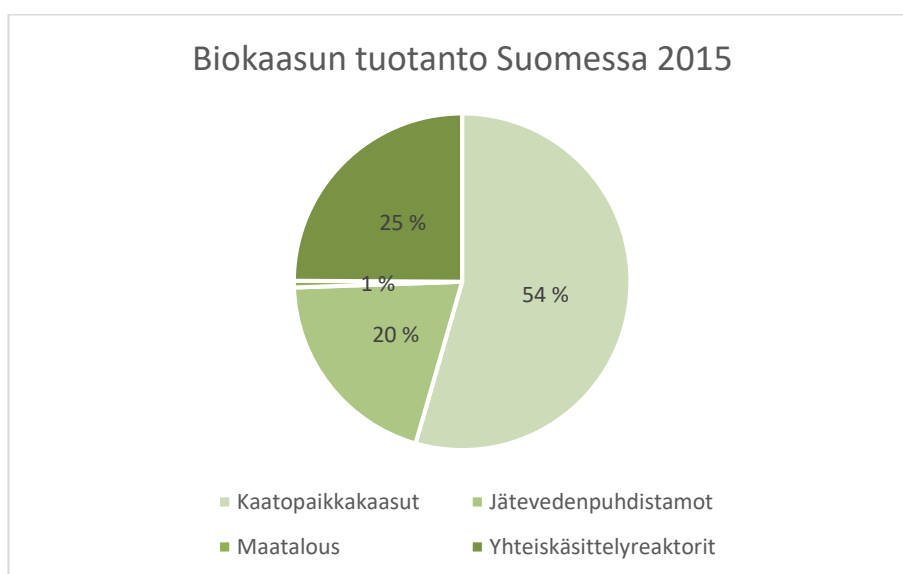
**Kuva 2-2.** Suomen kaatopaikoilla tuotettu biokaasu 2005-2015. [23]

Yhdyskuntajätteistä toinen merkittävä osa on jätevedenpuhdistamoilla muodostuvat jätevedenpuhdistuksen yhteydessä tulevat lietteet. Lietteitä hyödynnetään biokaasutuotannossa sellaisenaan sekä yhteiskäsittelyssä yhdyskuntajätteissä olevan biojätteen kanssa. Näitä lietemädättämiä oli Suomessa vuonna 2015 käytössä 14 kappaletta, ja niiden tuotanto oli 29,8 miljoonaa kuutiota 60-68% metaanipitoisuuden omaavaa biokaasua. Viimeisen 20 vuoden aikana lietteiden käsittelyyn perustuva biokaasutuotanto on kasvanut noin 50%, mutta kasvu on ollut huomattavasti tasaisempaa kuin monella muulla syötteellä. Kuvassa 2-3 kuvataan lietteidenkäsittelylaitoksilla tuotetun biokaasun määrää Suomessa vuosina 2005-2015. [23,28]



**Kuva 2-3.** Lietteiden avulla tuotettu biokaasu Suomessa vuosina 2005-2015. [23]

Yhteismädätyslaitoksilla, eli laitoksilla joissa käsitellään lietteitä sekä biojätteitä, tuotettiin vuonna 2015 38,1 miljoonaa kuutiota biokaasua. Hyvin tuotantoon soveltuvia biojätteitä ovat muun muassa elintarvike-, panimo- sekä teurastamotoiminnasta tulevat jätevirrat. Sellu- ja paperiteollisuudessa syntyy myös erilaisia, biokaasun tuotantoon soveltuvia lietteitä. Teollisuussyötteet voivat olla vaikeita käsiteltäviä, jolloin niiden tuotanto ei välttämättä ole järkevää tai mahdollista. Kuvassa 2-4 kuvataan biokaasun tuotannon jakaumaa vuonna 2015. [23,28]



**Kuva 2-4.** Biokaasun tuotanto Suomessa vuonna 2015 syötteiden mukaan eriteltynä. [23]

## 2.1.2 Energiakasvit

Energiakasveilla tarkoitetaan sellaisia kasvibiomassoja, joita kasvatetaan pääasiallisesti energiantuotantoon. Niitä voi muodostua myös muiden toimintojen sivuvirtana. Suomen oloissa energiakasveina on tutkittu muun muassa nurmirehua, rehumaisia sekä ruokohelpeä. Yleistä näille kasveille on suurien satojen saaminen pienellä tuotantopanoksella. Suurimman potentiaalin kuitenkin Suomen oloissa omaa nurmi. Toisin kuin ruokakasveilla, energiakasvien käyttö energiantuotantoon ei ole pois ruoaksi kelpaavasta tuotannosta. [23,28,47]

Nurmea kasvaa Suomessa kesantopelloilla noin 3,5 miljoonaa tonnia, sekä rehukäytössä muodostuu lisäksi ylituotantoa sekä hävikkiä. Nurmelle ei ole aina käyttökohdetta. Sillä on kuitenkin positiivinen vaikutus maan rakenteeseen viljelykiertojen välikasvina, mutta sen merkitys vähenee, koska sadolla ei ole rahallista arvoa. Tuotannon erikoistuminen omiin tarpeisiin näkyy peltojen maaperässä, jonka rakenne heikkenee sekä köyhtyy. Suurin osa Suomen nurmirehusta käytetään tällä hetkellä kotieläintilojen eläinten ruokintaan. [23,28,47]

Kasvibiomassojen soveltuvuuteen biokaasun tuotannossa on monia tekijöitä. Oleellisia kasvin ominaisuuksia ovat kuiva-ainepitoisuus Total Solids TS, orgaanisen aineen määrä Volatile Solids VS, kuiturakenne, hiili-typpisuhde C: N sekä metaanintuottopotentialiaali. Taulukossa 2.1 esitetään eri kasvibiomassojen metaanintuottopotentialiaaleja muodossa  $\text{Nm}^3/1000\text{kg}$ . [23,47]

**Taulukko 2.1.** Kasvibiomassojen metaanintuottopotentialiaaleja. [23]

<i>Kasvi</i>	<i>Olki</i>	<i>Nurmi</i>	<i>Ruokohelpi</i>	<i>Maissi</i>	<i>Sokerijuurikas</i>
$\frac{V_{CH_4}}{m_{VS}}$	240-320	213-410	253-351	312-410	340
$\frac{V_{CH_4}}{m}$	199-260	72-104	47-116	-	34

## 2.2 Biokaasun muodostuminen ja käsittelyjäännös

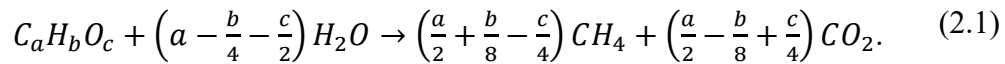
Biokaasulaitoksissa syöte tai syötteet määräävät käytetyn tai sopivimman tuotantoprosessin. Jotkut syötteet vaativat esikäsittelyjä hajotakseen tai niitä käytetään tehostamaan metaanintuotantoa, jotkut vaativat jatkuvaa sekoitusta reaktorin sisällä, ja jotkut syötteet haajoavat itsestään ilman jatkuvaa ulkopuolista vaikutusta prosessiin. Lisäksi reaktorin sisällä kaasua tuottavat mikrobit tarvitsevat tietyn lämpötilan ja pH-tason toimiakseen halutulla tavalla. Tietty aineet, kuten metallit, suolat ja hajoamisessa syntyvät tuotteet, pääs-

tessään reaktoriin inhiboivat sisäistä anaerobista hajoamista, ja vaikuttavat metaanituot-  
toon haitallisesti. Inhiboivien aineiden vaikutusta pyritään minimoimaan syötevalinnalla  
sekä prosessiteknisillä ratkaisulla. Taulukossa 2.2 on selitetty erilaisia biokaasuproses-  
seihin sekä syötteisiin liittyviä käsitteitä. [28,33]

**Taulukko 2.2.** Syötteen anaerobiseen hajoamiseen biokaasureaktorissa liittyvät käsitteet  
ja niiden merkitys toimintaan ja prosessihallintaan. [4,28,33,58]

<b>Käsite</b>	<b>Merkitys prosessiin</b>
<b>TS</b>	Kiintoaineen osuus syötteessä. Vaikuttaa syötteen siirtoon reaktoriin, pro- sessienergian tarpeeseen, laitosrakenteeseen sekä metaanintuottopotentia- aliin.
<b>VS</b>	Orgaanisen aineen osuus kiintoainepitoisuudesta. Mitä suurempi VS/TS suhde, sitä soveltuvampi syöte on biokaasutuotantoon. VS kertoo, kuinka suuri osa syötteen orgaanisesta sisällöstä voi muuttua biokaasuksi.
<b>BMP</b>	Biochemical methane potential, metaanintuottopotentiaali. Riippuu syöt- teen kemiallisesta koostumuksesta. Yksikkö $\left[ \frac{V_{CH_4}}{m_{syöte}} \right] = \left[ \frac{dm^3}{kg_n} \right]$ , ilmoitetaan joko tuorepainon, TS:n tai VS:n suhteen.
<b>Tuore- paino</b>	Syötteen kokonaispaino, sisältäen veden.
<b>Hiili- typpi- suhde</b>	Syötteessä olevan hiilen ja typen suhde C: N. Optimialue biokaasun tuot- tannossa 15:1 – 25:1. Korkea typen määrä voi johtaa prosessia inhiboivan ammoniakin muodostumiseen, mutta tyyppiä kuitenkin tarvitaan mikrobi- toimintaan.
<b>OLR</b>	Organic Loading Rate, reaktorin orgaaninen kuormitus. Kuvaa reaktoriin syötettyä orgaanisen aineen massavirtaa reaktorin toimintatilavuutta kohti. Yksikkö $\left[ \frac{m_{VS}}{V} \right] = \left[ \frac{kg}{m^3 d} \right]$
<b>HRT</b>	Hydraulic Retention Time, prosessin viipymäaika. Määritetään reaktorin tilavuuden ja syötteen tilavuusvirran suhteesta. Suuruusluokka biokaasu- reaktoreissa on 20-30 päivää.

Biokaasun muodostumista syötteestä voidaan mallintaa teoreettisesti niin sanotulla  
Bushwellin yhtälöllä. Sen mukaan orgaanisen aineen  $C_aH_bO_c$  metaanintuotto voidaan las-  
kea yhtälön (2.1) mukaan



Bushwellin yhtälö ei kuitenkaan huomioi kaikkia reaktioon vaikuttavia asioita, kuten reaktiota inhiboivia yhdisteitä tai reaktorin olosuhteita. Syötteen tarkka kemiallinen rakenne voi myös olla vaikeaa määrittää tai tietää käytännössä. Myös useamman syötteen yhtäaikaisten hajoamisen synerginen vaikutus jää huomioimatta. [28,33]

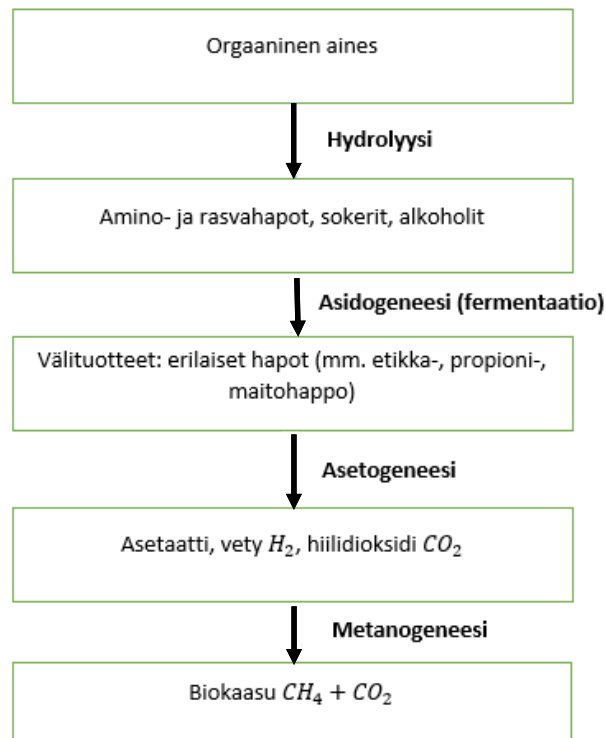
Syötteen metaanintuotto voidaan määrittää myös kokeellisesti BMP-testillä. Menetelmä on standardoitu, jossa syöte laitetaan panosluontoisesti pienen määrän jo toimivan biokaasureaktorin poistolietteen kanssa hapettomaan, vakiolämpötilaiseen tilaan. Vastaava testi tehdään rinnakkain myös käytetyn poistolietteen, ympin, kanssa. [28]

## 2.2.1 Anaerobinen hajoaminen ja sen hallinta

Biokaasun tuotanto biokaasureaktorissa perustuu syötteen anaerobiseen, hapettomaan, hajoamiseen. Sen seurauksena syötteestä muodostuu biokaasua sekä mädätysjäännöstä. Reaktio tapahtuu myös itsestään esimerkiksi kaatopaikoilla, suo- ja vesistöalueilla sekä märehtijöiden ruoansulatusjärjestelmissä. Anaerobisen hajoamisen ymmärtäminen on oleellista biokaasureaktorin suunnittelussa sekä prosessin käytössä. [28]

Syötteen hajottamiseen osallistuu useita erityyppisiä mikro-organismeja, jotka ovat osittain riippuvaisia toisistaan. Metaanin muodostumisen syötteestä vaatii neljä eri välivaihetta, jotka tapahtuvat ajan suhteen lineaarisesti edellisen vaiheen valmistuttua. Jos jokin vaihe häiriintyy, koko prosessiin tulee häiriö sekä metaanintuotto heikkenee. Eri vaiheissa toimivat mikro-organismit tarvitsevat myös kaikille sopivat olosuhteet yhtäaikaaisesti. Käytännössä mikrobikannat valikoituvat olosuhteiden mukaisesti. Tästä seuraa se, että merkittävät olosuhdevaihtelut, mukaan lukien vaihtelut syötteen laadussa ja määrässä, häiritsevät prosessia. Anaerobisen hajoamisen päävaiheet ja välituotteet on esitetty kuvassa 2-5. [28]





**Kuva 2-5.** Anaerobisen hajoamisen vaiheet ja välituotteet. [28]

Hydrolyysivaiheessa suuret molekyylit, kuten rasvat, proteiinit ja hiilihydraatit, hajoavat pienemmiksi osiksi ja liukoistuvat. Nämä syötteessä olevat suuret orgaaniset molekyylirakenteet ovat liian suuria mikrobien hyödynnettäväksi sellaisenaan. Näitä mikrobeja, bakteereita, kutsutaan hydrolyyttisiksi bakteereiksi. Tyypillisesti nämä bakteerit osallistuvat myös seuraavan vaiheeseen, asidogeneesiin. Hydrolyysiin osallistuvat bakteerilajit tunnetaan yleisesti hyvin. [28]

Asidogeneesin seurauksena edellisen vaiheen pienemmäksi pilkotut molekyylirakenteet muuttuvat erilaisiksi hapoiksi. Fermentoivat mikrobit käyttävät ensimmäisessä vaiheessa saatuja sokereita ja alkoholeja niin kutsutuiksi haihtuviksi rasvahapoiksi, Volatile Fatty Acids, VFA. Vaiheessa muodostuu myös prosessia inhiboivaa ammoniakkia sekä hiilidioksidia ja vetyä, joita hyödynnetään hajoamisen myöhemmässä vaiheessa. Tämän vaiheen tuotteiden koostumus ja määrä vaihtelevat syötteistä ja olosuhteista riippuen. Asidogeneesin eteneminen voidaan huomata prosessin pH-tason laskuna syötön jälkeen. [28,33]

Asetogeneesivaiheessa asidogeneesissä muodostuneet tuotteet hapettuvat metaanin tuotannon raaka-aineiksi. Koska prosessi kokonaisuudessaan on anaerobinen, hapettuminen tapahtuu hapettuneiden yhdisteiden, kuten nitraatin, sulfaatin ja karbonaatin, avulla. Nämä yhdisteet toimivat elektronien vastaanottajina, jolloin ne pelkistyvät. Asetogeeniset bakteerit toimivat symbioottisesti vetyä kuluttavien metanogeenien kanssa. Korkea vety-pitoisuus reaktorissa haittaa asetogeenien toimintaa, joten metanogeenien täytyy konvertoida vetyä tehokkaasti metaaniksi. [28]

Anaerobisen hajoamisen viimeisessä vaiheessa metanogeenit tuottavat metaania ja hiili-dioksidia. Noin 70 prosenttia muodostuvasta metaanista syntyy asetaattia käyttävien metanogeenien toimesta. Nämä metanogeenit ovat hitaasti kasvavia, jolla on merkitystä esimerkiksi jatkuvasekoitteen biokaasureaktorin viipymäajan mitoituksessa: liian lyhyt viipymäaika poistaa metanogeeneja ulos reaktorista liian nopeasti, joka vaikuttaa merkittävästi metaanin tuottoon. Myös liian suuri kuormitus voi laskea reaktorin pH-tason liian matalalle, joka tuhoaa metanogeneesiin osallistuvat mikrobit kokonaan. [28,33]

Prosessin toiminnan kannalta hapettomuuden jälkeen tärkein tekijä on lämpötila. Metanogeenien kasvunopeus ja laatu riippuu siitä, missä lämpötilassa prosessi tapahtuu. Taulukossa 2.3 on esitetty eri lämpötilojen vaikutus metanogeenien kasvunopeuteen. Yleisesti ottaen suurin osa biokaasuprosesseista tapahtuu meso- tai termofiilisellä lämpötila-alueella, riippuen käytetystä syötteestä sekä sen käsittelyyn vaikuttavista tekijöistä, kuten hygienisoinnin tarpeesta. [28,31,33]

**Taulukko 2.3.** *Metanogeenien suhteellisen kasvunopeuden optimilämpötila-alue.* [28]

<i>Alueen nimi- tys</i>	<i>Lämpötila-alue (°C)</i>	<i>Metanogeenien suhteellinen kasvunopeus (%)</i>
<i>Psykrofiilinen</i>	18-20	20-22
<i>Mesofiilinen</i>	35-43	55-60
<i>Termofiilinen</i>	50-55	95-100

Prosessissa käytettyä lämpötilaa tärkeämpää on valitussa lämpötila-alueessa pysyminen. Metanogeenien toiminta on herkkää lämpötilan vaihtelulle, jonka tulisi pysyä suuruusluokassa  $\pm 0,5 - \pm 2$  °C. Termofiilisen alueen metanogeenit ovat herkempiä kuin mesofiilisen. Anaerobisessa hajoamisessa tuotettu energia sitoutuu pääasiassa tuotetun biokaasun sisältämään metaaniin, joten prosessi tarvitsee käytännössä usein ulkopuolisen lämmönlähteen ylläpitämään haluttu lämpötilataso. Tason valinta vaikuttaa käytetyn prosessienergian tarpeeseen. Reaktorin hyvä lämpöeristys sekä syötteen sekoitus reaktorin sisällä takaavat tasaisen lämpötilajakauman koko reaktorin sisällä. [28,31,33]

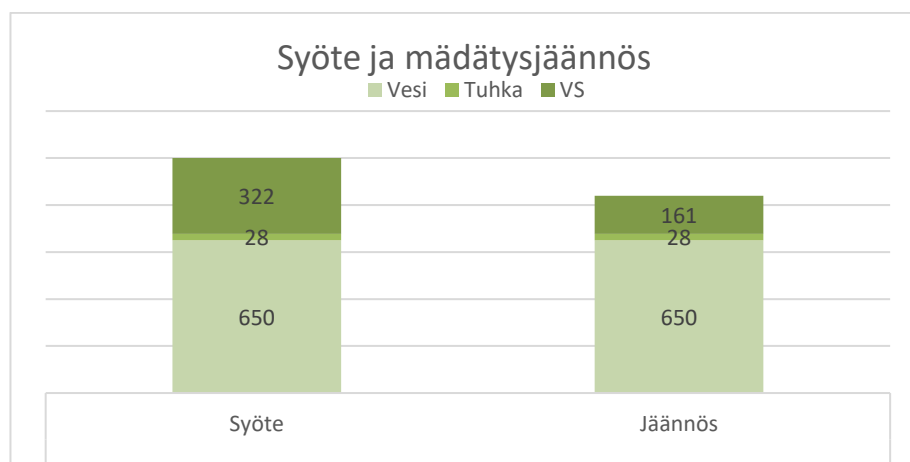
Lämpötilariippuvuuden lisäksi reaktorin mikrobien aktiivisuus riippuu reaktorin sisäisestä pH-arvosta. Hyvin toimivan reaktorin pH-arvo on lähellä neutraalia arvoa 7, mutta hajoamisen vaiheiden eri mikrobit tarvitsevat hieman erilaisia pH-tasoja. Anaerobisen hajoamisen kaksi ensimmäistä vaihetta toimivat tehokkaimmin pH:n ollessa selkeästi happaman puolella, noin 5-6, mutta tässä tasossa metanogeenit ja koko prosessiketju ovat vaarassa. Etenkin jatkuvasyötteisen kuivareaktorin tapauksessa reaktorin pH-arvoa on seurattava syötön jälkeen, jotta sopiva kuormitus osataan määrittää. Tällöin on myös tär-

keää pitää syöttömäärät mahdollisimman tasaisena päivästä toiseen. Käytännössä reaktorin pH-taso asettuu itsestään hyvin ohjatun syötön avulla sopivalle tasolle, eikä ulkoista pH:n säätöä tarvita. [28,33]

## 2.2.2 Käsittelyjäännöksen hyödyntäminen

Biokaasulaitoksessa syötteen hajotessa anaerobisesti syötteestä jää aina jäljelle määrällisesti merkittävä osa niin kutsuttua käsittely- tai mädätysjäännöstä. Varsinkin märkäprosessissa syötteen ja käsittelyjäännöksen välisessä massassa ei ole käytännössä mitään eroa. Käsittelyjäännökseen jää myös kaikki syötteessä olleet arvokkaat ravinteet, mutta myös mahdolliset haitalliset aineet. Jäännöstä voidaan siis käyttää hyvin joko kasvintuotannon lannoitteena tai teollisuussovelluksissa, kunhan sen koostumus ja ominaisuudet tunnetaan tarkasti. [28,47]

Kuvassa 2-6 kuvataan säilörehun hajoamista mädätysjäännökseksi biokaasureaktorissa. Tyypillisesti säilörehussa kiintoainepitoisuus on noin 25-40 prosenttia, josta noin 92 % on orgaanista ainetta. Tästä noin 50-70 prosenttia hajoaa muodostaen biokaasua, riippuen prosessin lämpötilasta sekä prosessityypistä. Huomioitavaa on, että mitä korkeampi syötteen kiintoainepitoisuus TS, sitä suurempi osuus syötteen massasta voi muuttua biokaasuksi. Lisäksi pienemmän kuiva-ainepitoisuuden omaavat syötteen tarvitsevat enemmän prosessienergiaa korkeamman pumppujen sähkönkulutuksen sekä lämmitysenergian tarpeen vuoksi. [23,24,28,33,47]



**Kuva 2-6.** Säilörehun ja sitä vastaavan jäännöksen koostumus tarkasteltaessa 1000 gramman syötemassan hajoamista. [28,33]

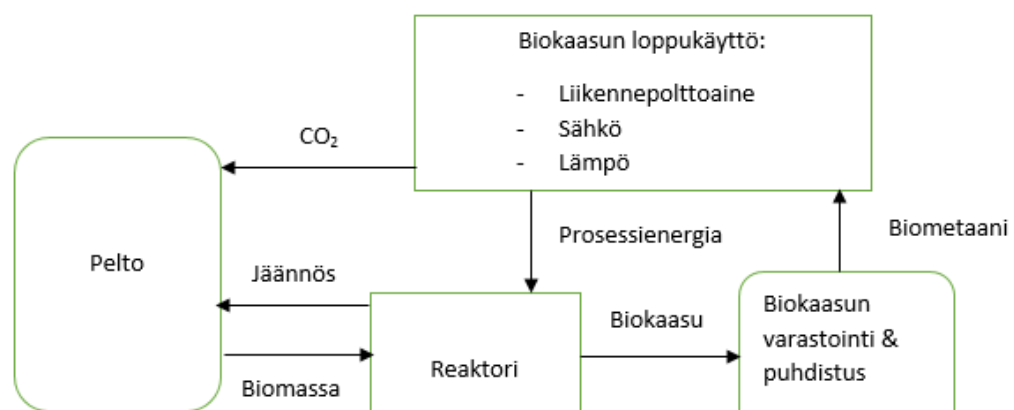
Käsittelyjäännös sisältää kaikki pää- ja hivenravinteet, joita ovat esimerkiksi typpi, fosfori, kalium sekä magnesium. Ravinteiden määrä syötteen muuttuessa jäännökseksi pysyy vakiona, mutta prosessin asidogeneesivaiheen seurauksena tapahtuu typen liukoistumista. Tällöin osa syötteessä olevasta orgaanisesta tyyppistä hajoaa ammoniumtyypeksi  $\text{NH}_4\text{-N}$ , niin sanotuksi liukoiseksi tyypeksi. Liukoisen typen muodostuminen biokaasuprosessissa parantaa käsittelyjäännöksen arvoa kasvintuotannon lannoitteena verrattuna

syöttömateriaaliin sellaisenaan. Liukoisen typen muodostuminen on voimakkainta kasvi-biomassojen anaerobisessa hajoamisessa, jossa sen pitoisuus voi kasvaa jopa 80 prosenttia, lannan hajoamiselle vastaava muodostuminen on noin 20 prosenttia. Biokaasuprosessi toisaalta nostaa aineen pH:ta, joka on huono asia typen haihtuvuuden kannalta. Jäännöksen asianmukainen käsittely, varastointi ja jatkoprosessointi ovat tärkeitä jäännöksen hyödyntämisen kannalta. Anaerobisen hajoamisen on huomattu myös merkittävästi vähentävän hajua aiheuttavia yhdisteitä, jolla voi olla suuri arvo esimerkiksi sian lannan käsittelyssä ja lannoitekäytössä. [28,33]

Biokaasuprosessissa käytettävät raaka-aineet voivat myös sisältää mädätysjäännöksen loppukäyttöön liittyviä häiritseviä yhdisteitä ja bakteereita. Tällaisia ovat esimerkiksi erilaiset lääke- ja hormonivalmisteet, orgaaniset haitta-aineet sekä metallit. Käsittelemättömistä jätteistä on löydetty esimerkiksi Salmonella- ja Kampylobakteereita, yhteensä noin 150 erilaista bakteerilajiketta. Tällaiset yhdisteet ja bakteerikannat voivat päätyä jäännöksen jatkokäytön yhteydessä takaisin maaperään ja aiheuttaa ongelmia. Yleensä yhdyskuntajätteitä hyödyntävässä laitoksessa syöte on hygienisoitava termisesti ennen sen syöttöä prosessiin. Laitoksessa käytetyt syötteet on siis tunnettava, ja ravinteiden kiertotalouteen vaikuttavat riskitekijät on huomioitava prosessissa ja jäännöksen loppukäytössä. [28,33]

## 2.3 Biokaasun tuotantoprosessit

Biokaasuprosesseissa on tietyt pääprosessivaiheet prosessin koosta tai syötteestä riippumatta. Syötteet vaativat jonkinlaista esikäsittelyä sekä varastointia ennen reaktoriin siirtymistä, sekä reaktorista saatava mädätysjännös varastoidaan tai hyödynnetään prosessissa ennen loppukäyttöä lannoitteena. Prosessissa käytetty syöte määrää laitoksessa käytetyn tekniikan. Kuvassa 2-7 on esitetty nurmea käyttävän biokaasulaitoksen prosessi sekä ravinteiden- ja hiilen kierto. Sama kierto kuvaa pääpiirteittäin myös muita biokaasun tuotantoprosesseja. [28,47]



**Kuva 2-7.** Nurmea käyttävän biokaasulaitoksen kiertotalouden kuvaus. [33]

Biokaasulaitoksessa käytettävä syötteen kuiva-ainepitoisuus määrää syötteelle sopivimman prosessityypin. Pääasiallisesti prosessit jaetaan kuiva- ja märkäprosessiin, joista kuivaprosessi voi vielä jakautua jatkuva- ja panostoimiseksi. Prosesseissa voi myös olla yksi tai kaksi eri vaihetta. Biokaasuprosessia valittaessa on myös pidettävä mielessä laitoksen haluttu energiantuotto sekä biokaasun ja jäännöksen loppukäyttö. Eri prosessit tarvitsevat myös erilaiset resurssit niiden käytössä ja hallinnassa. Jatkuviissa prosesseissa käytetyn syötteen TS-pitoisuus vaikuttaa prosessienergian tarpeeseen [28]. Taulukossa 2.4 on esitelty erilaisia kuiva- ja märkäprosesseja, sekä niiden ominaispiirteitä. [28,33]

**Taulukko 2.4.** *Biokaasuprosessien välinen vertailu. Prosessienergian tarve kuvaa kolmen esitetyn prosessityypin välistä vertailua. [28,33]*

	<i><b>Kuivaprosessi (jatkuva)</b></i>	<i><b>Kuivaprosessi (panos)</b></i>	<i><b>Märkäprosessi</b></i>
<i><b>Syötteen TS-pitoisuus (%)</b></i>	20-40	$\leq 50$	$\leq 13-15$
<i><b>Syötteen käsittely</b></i>	Homogenisointi	Esisekoitus	Homogenisointi
<i><b>Tyypillinen häiriötilanne</b></i>	Murskaimen tukkeutuminen, liian suuri syöttö	Sprinklereiden tukkeutuminen	Vaahtoaminen, epähomogeenisuus
<i><b>Laitos</b></i>	Yksi- tai monivaiheinen	Moduuliratkaisu	Yksi- tai monivaiheinen
<i><b>Käyttöhäiriö</b></i>	Hetkellinen tai ei vaikutusta	Vaikutus yhteen panokseen	Vaikuttaa koko prosessiin
<i><b>Prosessienergian tarve</b></i>	Kohtalainen, pienempi kuin märkäprosessin	Pienin	Suurin
<i><b>Soveltuvat syötteen</b></i>	Energiakasvit, biojäte, lanta	Energiakasvit, biojäte, lanta	Lietemäiset syötteen
<i><b>Hygienisointi</b></i>	Ei ongelmaa	Ei ongelmaa	Ongelmallisempi

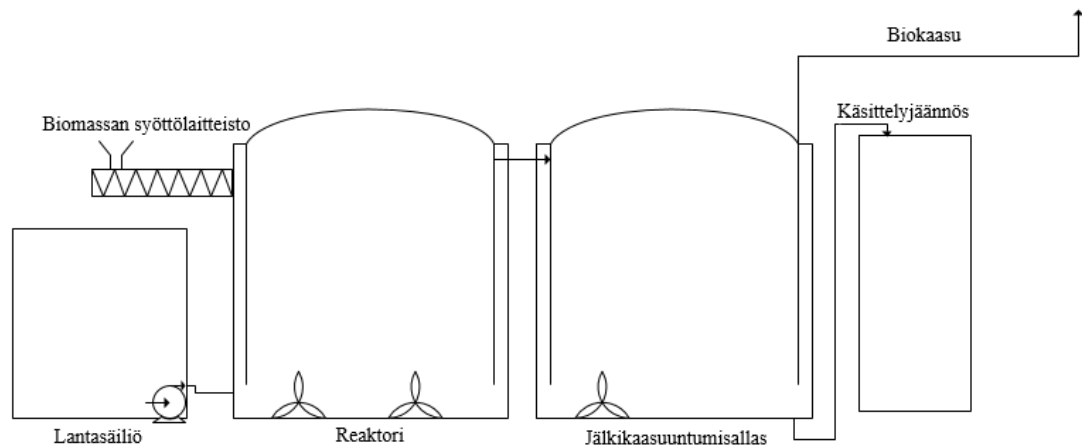
### 2.3.1 Jatkuvatoiminen märkäprosessi

Jatkuvatoiminen märkäprosessi on Suomessa yleisin biokaasun tuotantoprosessi. Syötteen pieni kiintoainepitoisuus mahdollistaa syötteen pumppaamisen reaktoriin ja sieltä

pois. Prosessiin voidaan myös lisätä muita syötteitä erillisellä syöttölaitteistolla, kuten nurmea tai biojätteitä. Kuitenkin mädätysjäännöksen poiston kannalta rajoittavaksi tekijäksi tulee kiintoainepitoisuus. Kuivan syötteen, kuten energiakasvin, käyttö märkäprosessissa on kuitenkin mahdollista, jos se laimennetaan esimerkiksi reaktorista separoidulla nesteellä ennen syöttöä. Märkäprosessille tyypillistä on suurempi tarvittava reaktoritilavuus syötteen massavirtaa kohti kuin kuivaprosessille. [23,28,33]

Märkäprosessissa käytetty reaktori on yleensä lieriömainen. Siinä on jatkuva homogenisointi, joka toteutetaan mekaanisesti sekoittamalla tai kierrättämällä tuotettua biokaasua reaktorin pohjassa olevien venttiilien avulla. Syötteen yhtenäinen koostumus reaktorissa takaa tasaisen biokaasun muodostumisen. Reaktorin vaipassa kierrätetään lämmitettyä vettä, joka ylläpitää halutun lämpötilatason reaktorin sisällä. Tarvittava lämpö tuotetaan joko biokaasulla polttamalla tai se otetaan talteen syötteen hygienisoinnista tai lämpimästä käsittelyjäännöksestä lämmönvaihtimien avulla riippuen toteutusratkaisusta. [23,28,31]

Reaktorin jatkuva täyttö edellyttää myös jatkuvaa mädätysjäännöksen poistoa, joka on yleensä toteutettu niin, että reaktorin sisällä oleva massa pysyy vakiona. Syöttö ja poisto on yleensä suunniteltu joko täysin jatkuvaksi tai esimerkiksi kerran vuorokaudessa tapahtuviksi. Erona panosmaiseen ratkaisuun on se, että uuden syötteen lisäys ja jäännöksen poisto tapahtuvat reaktorista ilman koko reaktorin sisällön vaihtoa. Prosessi on yksivaiheinen, jos jäännös poistetaan reaktorista ilman jälkikaasuuntumista. Tämä kuitenkin lisää laitoksen kokonaispäästöjä, koska jäännöksessä olevat metanogeenit tuottavat metaania vielä sen poistuttua reaktorista, joka voi mitätöidä laitoksen tuottamat positiiviset ympäristövaikutukset. Kaksivaiheisessa prosessissa reaktorista tuleva jäännös johdetaan vielä jälkikaasuuntumisaltaaseen, jossa jäännöksestä muodostuva jälkikaasu saadaan otettua talteen sekä hyödynnettyä itse reaktorista tulevan biokaasun kanssa. Kuva 2-7 kuvaa jatkuvassa märkäprosessissa olevaa massansiirtolaitteistoa. [23,28,31,33]



**Kuva 2-8.** *Jatkuvan kaksivaiheisen märkäprosessin massavirtaukseen liittyvät oleelliset komponentit. [28]*

Jatkuvasta sekoituksesta seuraa myös se, että pieni osa äskettäin lisätystä syötteestä päätyy reaktorista ohi suoraan jäännöksen mukana ennen sille mitoitettua viipymääikää sekä osa reaktorin massasta voi olla viipynyt reaktorissa suunniteltua kauemmin. Biokaasureaktori pyritään mitoittamaan tilavuudeltaan yleensä mahdollisimman pieneksi investointikustannusten minimoimiseksi, mutta viipymäaika sekä reaktorin sisäiset virtaukset tulee selvittää niin, että keskimääräinen viipymäaika saadaan mahdollisimman hyvälle tasolle. Liian suuri syötteen ohivirtaus reaktorista johtaa myös laitoksen metaanipäästöihin, mädätysjäännöksen laadun heikkenemiseen sekä biokaasutuoton laskuun, jotka tukevat jälkikaasuuntumisaltaan lisäinvestoinnin kannattavuutta. [28,33]

### 2.3.2 Jatkuvatoiminen kuivaprosessi

Jatkuvatoiminen kuivaprosessi eroaa märkäprosessista reaktorin sisäisen virtauksen perusteella. Reaktorin sisällä oleva syötemassa pyritään siirtämään sekoittimilla hitaasti yhtenä massana koko reaktorin pituudelta, sen samalla tuottaessa biokaasua. Kyseistä virtausta nimitetään tulppavirtaukseksi. Syöttöön on lisättävä jo kertaalleen prosessin läpi käynyttä käsittelyjäännöstä, jotta anaerobisen hajoamisen tarvitsema mikrobitasapaino pysyy halutulla tasolla. Reaktorin ja jäännöksen välinen nesteiden kierrätys on optimoitava, jotta hajoamista inhiboivaa typpeä ei pääse muodostumaan liikaa reaktorin sisälle. Jatkuvatoimisia kuivaprosesseja on käytetty lähinnä biojätteiden ja sitä vastaavien syötteiden käsittelyssä, Suomessa ensimmäinen pilot-kokoluokan laitos joka käyttää syötteenä pelkkää nurmea on Sotkamossa Luonnonvarakeskuksen käytössä. [28,33]

Jatkuvan kuivaproessin haasteena on mädätysjäännöksen soveltuvuus lannoitekäyttöön. Jäännös yleensä separoituu prosessin aikana kiinteäksi ja nestemäiseksi, jonka sekoitus on hankalaa, eikä sitä voida välttämättä käyttää nykyisissä lannoitteen levityslaitteissa. Mädätysjäännös on käytännössä jälkikäsiteltävä, eikä sillä ole vielä yhtä käyttökelpoista

jatkokäyttöä kuin märkäprosessin vastaavalla jäännöksellä. Biojätteitä hyödyntävässä reaktorissa jäännökseen päätyy myös puutteellisesta esikäsittelystä läpi päässeet haittaavat yhdisteet, kuten muovi, jotka tekevät siitä jatkokäyttöön lannoitteena täysin soveltumattonta. [28,33]

Nurmea käytettäessä jatkuva kuivaprosessi tarvitsee tarkasti säädetyn ja toimivan syöttölaitteiston. Rehu syötetään syöttöruuvilla reaktoriin, joka on herkkä tukoksille ja aiheuttamaan häiriöitä. Rehua ei saa altistaa liian kovalle puristusvoimalle, koska silloin sen kiinteä aines alkaa separoitua vedestä. Käytännössä syöttö on toteutettava niin, että pieneen raekokoon silputtu rehu syötetään suoralla ja paksulla ruuvilla suoraan reaktoriin. Myös reaktorin sisällä olevat sekoittimet täytyy mitoittaa niin, että niistä ei kohdistu liian suuria puristusvoimia sisällä olevaan syötteeseen. Kuivaprosessissa olevan syötteen korkeampi TS- ja VS-pitoisuus johtavat myös voimakkaampaan asidogeneesiin kuin märkäprosessilla, joka näkyy syötön jälkeen pH-tason sekä tuotetun biokaasun metaanipitoisuuden laskuna. [33]

### 2.3.3 Panostoiminen kuivaprosessi

Panosprosessit soveltuvat vain kuiville syötteille. Reaktori täytetään kerralla, ja sisällä olevan syötteen annetaan hajota halutun aikajakson yli ennen tyhjennystä. Tämä aikaväli voi olla jopa puoli vuotta. Panosprosessi ei tarvitse muuta ulkopuolista vaikutusta kuin reaktorin sisällä muodostuvan veden kierrätyksen sprinklereiden avulla, joka tehostaa mikrobien kiertoa koko massan kautta, säätelee panoksen kosteuspitoisuutta sekä tehostaa biokaasun tuotantoa. Panostoimisen prosessin etuina on modulaarisuus, joka mahdollistaa tuotannon kasvun käyttämällä useita panoksia rinnakkain, sekä pienemmät tarvittavat investointi- ja käyttökustannukset kuin jatkuvatoimisilla kuivaprosesseilla. Prosessi on kuitenkin tehottomampi kuin jatkuva prosessi ja sen hallinta on vaikeampaa. [24,28]



**Kuva 2-7.** Suomalaisen Metener Oy:n kehittämä panostoiminen kuivareaktori. [26]



Suomalaisen Metener Oy:n suunnittelema panostoiminen kuivareaktori aloitti tuotantonsa syksyllä 2015. Reaktori hajottaa nurmea noin 4 tonnia päivässä, ja sen reaktoritilavuus on  $720 \text{ m}^3$ , jolloin yhdestä panoksesta saatava energiamäärä on noin 300-500 MWh. Panostus vaatii vuositasolla noin 50 hehtaarin nurmituotannon. Reaktori ei vaadi päivittäistä työtä, ja panoksen vaihtamiseen kuluu vuosittain vain noin kaksi viikkoa työaikaa. Tuotanto paranee ylös ajon jälkeen jokaisen panoksen vaihdon jälkeen. Reaktorin tuottaman biokaasun keskimääräinen teho on noin 100 kW, metaanipitoisuuden ollessa yli 70%. [24,26,33]

## 2.4 Biokaasun puhdistus ja jalostus biometaaniksi

Biokaasun puhdistamisella tarkoitetaan raa'assa reaktorikaasussa olevien epäpuhtauksien, kuten rikin, poistoa, koska nämä epäpuhtaudet aiheuttavat ongelmia esimerkiksi CHP-moottorissa tai tuottavat haitallisia päästöjä ympäristöön. Jalostuksella tarkoitetaan biokaasun jalostusarvon nostamista poistamalla siitä liikennekäytön ja varastoinnin kannalta haitallista hiilidioksidia. Puhdistettua ja jalostettua biokaasua kutsutaan biometaaniksi. Taulukossa 2.5 on esitetty anaerobisella hajoamisella tuotetun raa'an reaktorikaasun sekä kaatopaikkakaasun koostumus sisältäen epäpuhtaudet.

**Taulukko 2.5.** Reaktori- ja kaatopaikkakaasun komponenttien tilavuusosuudet. [28,33,14]

<i>Yhdiste</i>	<i>Raaka reaktorikaasu</i>	<i>Kaatopaikkakaasu</i>
<i>Metaani CH<sub>4</sub> (V-%)</i>	50-75	20-60
<i>Hiilidioksidi CO<sub>2</sub> (V-%)</i>	25-50	25-50
<i>Typpi N<sub>2</sub> (V-%)</i>	0-2	4-35
<i>Hiilimonoksidi CO (V-%)</i>	0-0,2	0-0,2
<i>Happi O<sub>2</sub> (V-%)</i>	0-1	0,5-5
<i>Vety H<sub>2</sub> (V-%)</i>	0-0,5	0-0,5
<i>Rikkivety H<sub>2</sub>S (V-%)</i>	< 0,8	< 3
<i>Ammoniakki NH<sub>3</sub> (<math>\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}</math>)</i>	0-3	0-1
<i>Siloksaanit (<math>\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}</math>)</i>	0-5	0-25
<i>Halogenoidut hiilivedyt (<math>\frac{\text{mg}}{\text{m}^3}</math>)</i>	0	0,2-7

Raaka biokaasu sisältää myös aina reaktorin sisällä olevasta vedestä haihtuvaa vesihöyryä. Yleisimmät reaktorikaasun puhdistusvaatimukset koskevat juuri kylläisen vesihöyryn ja rikkivedyn poistoa, joita esiintyy kaikilla syötteillä tuotetussa raakakaasussa sekä ne muodostavat keskenään rikkihappoa. Yhdyskuntajätteitä tai lietteitä käsittelevissä reaktoreissa tuotettu kaasu tarvitsee myös ammoniakkin, siloksaanien, halogenoitujen hiilivetyjen sekä pienhiukkasten poistoa. Kaasussa olevat hiilidioksidi ja typpi eivät aseta vaatimuksia puhdistukselle, koska inertteinä kaasuina ne eivät aiheuta ongelmia missään biokaasun siirto-, varastointi- tai käyttökohteessa. Epäpuhtauksien poistotarve on aina tutkittava ja mitoitettava tuotetun kaasun koostumuksen sekä laitevalmistajien asettamien puhtausvaatimuksien mukaan. [28,33,56]

Paikallista, hajautettua energiatuotantoa varten biokaasun ei tarvitse olla jalostettua, mutta lämpökattilat, moottorit ja ennen kaikkea polttokennot tarvitsevat epäpuhtauksien poiston. [28,33] Biokaasureaktorista saatava raaka reaktorikaasu ei sovellu mihinkään nykyaikaiseen energiantuotantoon sellaisenaan. Se voidaan kuitenkin polttaa ilman esikäsittelyä, jos sillä saavutetaan ympäristön kannalta suotavampi lopputulos, kuten biokaasulaitoksen häiriötilanteen aikana.

### 2.4.1 Puhdistus

Biokaasun puhdistukseen käytettävät menetelmät valitaan yleensä tuotetun kaasun jalostusasteen tarpeen ja investointikustannusten minimoinnin mukaan. Tiettyjä osia puhdistuksesta voidaan liittää muihin osiin biokaasun käsittelylaitteita, kuten rikinpoisto aktiivivihiilen avulla jalostusyksikön yhteydessä tai vesihöyryn poisto kaasuvälikon yhteydessä. Rikki voidaan poistaa myös biologisesti suoraan reaktorissa käyttämällä pientä happi-injektiota suoraan reaktorin kaasutilaan. Yksinkertaisin tapa Suomen ympäristössä poistaa vesihöyry on käyttää kondenssivesikaivoa suoraan kaasuvälikon yhteydessä, joka kuivaa kaasun tehokkaasti ilman ulkopuolista energiaa tai materiaaleja vaativaa laitteistoa. [28,33,56]

Kaasussa oleva rikkivety aiheuttaa korroosiota esimerkiksi sähköntuotannossa käytetyn CHP-moottorin männissä ja tiivisteissä sekä kaasun siirtoputkissa. Käytettäessä ilma- tai happi-injektiota rikinpoistoon reaktorin kaasutilassa oleva rikkivety reagoi hapen kanssa muodostaen alkuainerikkiä sekä mahdollisesti pieniä määriä rikkidioksidia. Rikin hapettuminen perustuu reaktorissa olevaan *Thiobacillus*-bakteerikantaan, jolle voidaan asentaa oma fyysinen alue reaktorin yläosaan tai erilliseen kolonniin sen jälkeen. Ilman käyttämisen haittapuolena ovat, että happi reaktorin sisällä voi haitata reaktorissa tapahtuvaa anaerobista hajoamista, sekä liian korkea happipitoisuus kaasuseoksessa metaanin kanssa voi johtaa räjähdysvaaralliseen biokaasuun. Lisäksi ilman mukana tuleva typpi on vaikeaa erottaa biokaasusta mahdollisessa jalostusyksikössä. Yhdyskuntalietteitä syötteenä käyttävissä biokaasureaktoreissa rikinpoisto voidaan toteuttaa syöttämällä rautaa sisältäviä yhdisteitä, kuten  $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_3$  tai  $\text{FeSO}_4$ , suoraan reaktoriin, jotka sitovat rikkiä itseensä. [33,56]

Taulukossa 2.6 on esitelty biokaasusta puhdistettavat epäpuhtaudet, niiden aiheuttamat ongelmat prosessiin tai ympäristöön. Taulukkoon on myös lisätty yleisimmin käytetyt tekniikat yhdisteiden käsittelyyn.

**Taulukko 2.6.** Raakabiokaasun epäpuhtaudet, niistä seuraavat ongelmat sekä puhdistusmenetelmät. [28,33,56]

<i><b>Yhdiste</b></i>	<i><b>Ongelma prosessilaitteistoon</b></i>	<i><b>Ongelma ympäristöön</b></i>	<i><b>Käytetyt puhdistusmenetelmät</b></i>
<i><b>Vesihöyry</b></i>	Korroosio, tukkiutuminen (jäätyminen)	-	Adsorptio, absorptio, kondensointi
<i><b>Rikki</b></i>	Syöpyminen	Happamoituminen, myrkyllisyys	Biologinen, absorptio, adsorptio
<i><b>Halogenoidut hiilivedyt</b></i>	Syöpyminen	Happamoituminen, myrkyllisyys	Adsorptio, absorptio, jäähdytys
<i><b>Ammoniakki</b></i>	-	Myrkyllisyys, rehevöityminen	Absorptio veteen, adsorptio
<i><b>Siloksaanit</b></i>	Karstoittuminen	-	Adsorptio, absorptio, jäähdytys
<i><b>Hiukkaset</b></i>	Karstoittuminen	-	Absorptio, suodatus, sykloni
<i><b>Happi</b></i>	Räjähdyshaihtaus- tai leimahdusvaara	-	Adsorptio

Rikkivety voidaan poistaa myös adsorption avulla käyttäen natriumhydroksidipitoista liuosta. Biokaasu märkäpestään liuoksella, joka voidaan kierrättää uudelleen suljetussa kierrossa. Jos biokaasu aiotaan jatkojalostaa biometaaniksi, hyvä keino rikinpoistoon on fyysikaalinen adsorptio aktiivihiileen, koska se poistaa kaasusta myös pienen määrän hiilidioksidia. Aktiivihiilen käytön haittapuolena on kuitenkin hiilen vaihtotarve. Mikäli raakakaasussa on siloksaaneja tai halogeenisia hiilivetyjä, ne poistetaan myös joko absorptiolla orgaanisiin aineisiin tai adsorptiolla aktiivihiileen. [33,56]

## 2.4.2 Jalostus biometaaniksi

Puhdistetun biokaasun jalostuksen tarkoituksena on poistaa siinä vielä olevat inertit kaasut mahdollisimman tehokkaasti. Näin tekemällä tuotetun biometaanin volumetrinen

energiatiheys kasvaa, ja sen koostumus on lähellä maakaasun koostumusta. Se myös mahdollistaa biokaasun tuotannon ja käytön eriaikaistamisen tai siirron pois tuotantopaikalta joko paineistetussa säiliössä tai maakaasuverkkoa pitkin. Liikennekäyttöä varten tuotetussa biometaanissa biokaasussa olevaa hiilidioksidia ei yritetä poistaa täysin, koska metaanin seassa oleva pieni määrä hiilidioksidia parantaa kaasun oktaanilukua, joka on suotuisaa polttomoottorissa. Myös kaasun exergiatehokkuus paranee jalostusarvon kasvessa. Taloudellisesti biokaasun puhdistus biometaaniksi sähkön- tai lämmöntuotantoon ei ole järkevää tai tarpeellista. Taulukossa 2.7 on esitetty biokaasun, biometaanin sekä maakaasun koostumusten eroja sekä Ruotsin liikennebiokaasustandardin asettamat puhtaus- ja pitoisuusrajat liikennebiokaasulle. [28,33,42,56]

**Taulukko 2.7.** Eri metaanipohjaisten kaasujen koostumuksen vertailu sekä liikennebiometaanille asetetut tekniset vaatimukset. [15,28,42]

<b><i>Kaasun komponentti (V-%)</i></b>	<b><i>Raaka reaktori-kaasu</i></b>	<b><i>Raaka kaatopaikkakaasu</i></b>	<b><i>Maakaasu ja -keluverkosta</i></b>	<b><i>Liikennebiometaanin raja-arvot</i></b>
<b><i>Metaani CH<sub>4</sub></i></b>	50-75	20-60	98-99	≥ 97
<b><i>Hiilidioksidi CO<sub>2</sub></i></b>	25-50	20-50	0	-
<b><i>Typpi N<sub>2</sub></i></b>	0-2	4-35	0,9	-
<b><i>Rikkivety H<sub>2</sub>S</i></b>	< 0,8	< 3	0	23 $\frac{mg}{m^3}$ (NTP)

Taulukossa 2.7 kuvatut kuvaavat arvot koskevat autotehtaille asetettavia minimirajoja. Käytännössä henkilöautojen polttomoottoreissa käytetään pääsääntöisesti 90-98 prosenttisesti metaanista koostuvaa biometaania tai maakaasua. Yksittäisen ajoneuvon moottori voidaan kuitenkin säätää niin, että jalostusta ei tarvita ollenkaan. Otto-moottori tarvitsee noin 40 prosentin metaanipitoisuuden toimiakseen, stirling-moottori noin 20 prosenttia. [28,33]

Biokaasun jalostus biometaaniksi perustuu samankaltaisiin prosesseihin kuin biokaasun puhdistus: kemialliseen ja fysikaaliseen absorptioon sekä fysikaaliseen adsorptioon. Lisäksi kaupallisia tekniikoita ovat kryojalostus, joka perustuu biokaasun komponenttien kiehumis- ja sulamispisteiden välisiin eroihin, sekä kalvojalostus, joka perustuu kaasukomponenttien molekyylien välisiin kokoeroihin. Puhdistus- ja jalostusteknologia va-

litaan yleensä halutun lopputuotteen ja kaasulle suunnitellun käyttökohteen mukaan. Taulukossa 2.8 esitetään kaupallisten biokaasun jalostusteknologioiden tunnuslukuja. Esi-  
tetty metaanihävikki kuvaa prosessissa ympäristöön päätyvää metaanin osuutta syötetystä kokonaismäärästä. Liitteessä 1 on kuvattu jokaista kaupallista jalostusteknologiaa vastaava puhdistus- ja jalostusprosessi reaktorikaasusta biometaaniksi sekä yleisimpien puhdistusmenetelmien prosessikaaviot. [58]

**Taulukko 2.8.** Kaupallisten biokaasun jalostusteknologioiden vertailu. [28,56]

	<i>Fys. Absorptio</i>	<i>Kem. Absorptio</i>	<i>Adsorptio, PSA</i>	<i>Kryo</i>	<i>Kalvo</i>
<b>Metaanihävikki (%)</b>	1-4	0,01	1,5-10	0,1-2,0	1-15
<b>Sähkönkulutus <math>\frac{kwh}{m^3}</math> (NTP)</b>	0,23-0,33	0,06-0,17	0,16-0,35	0,18-0,25	0,18-0,35
<b>CH<sub>4</sub>-pitoisuus (%)</b>	≥ 96	≥ 99	≥ 96	≥ 99	≥ 96
<b>Esipuhdistus-tarve</b>	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
<b>Tyypen erotus-mahdollisuus</b>	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä	Kyllä
<b>Kapasiteetti <math>\frac{kwh}{m^3}</math> (NTP)</b>	5-100	≥ 100	≥ 5	≥ 100	≥ 5

## 2.5 Hiilineutraalius ja päästöt biokaasun tuotannossa

Biokaasu luetaan uusiutuvaksi energiaksi. Esimerkiksi säilörehusta tuotetun biokaasun poltossa muodostuva hiilidioksidi sitoutuu seuraavan vuoden säilörehusatoon. Kaatopaikkakaasujen tapauksessa kyse on metaanipäästöjen talteenotosta ja hyödyntämisestä, jotka muuten vapautuisivat kaatopaikoilta suoraan ilmakehään.

Biokaasutuotannon ympäristökestävyyttä voidaan kuitenkin parantaa tulevaisuudessa. Merkittäväksi osaksi energiakasveihin perustuvaa tuotantoa muodostuu siihen käytetty tuotantoketju, joka ainakin vielä perustuu fossiilista öljyä käyttäviin työkoneisiin. Myös laitosten suunnittelussa käytetyissä riskianalyyseissä voidaan keskittyä minimoimaan metaanipäästöt ympäristöön, eikä esimerkiksi reaktorin varoventtiileitä suunnitella niin, että biokaasu pääsee häiriötilanteessa suoraan ympäristöön. Raaka reaktorikaasu ei saa päästä missään tilanteessa suoraan ympäristöön ja soihtu tulee olla pakollinen osa jokaista biokaasuprosessia. [33]

Biokaasun ja biometaanin tuotannossa voidaan myös vaikuttaa sen päästöihin jo prosessin suunnitteluvaiheessa. Esimerkiksi biokaasun puhdistus ja jalostus biometaaniksi tuottaa erilaisia päästöjä suoraan tai epäsuorasti. Korkeampi energiakulutus tai ympäristöön hukattu biometaani tulee laskea mukaan laitoksen toiminnasta aiheutuviin päästöihin.

Tutkimuksessa [5] tutkittiin biokaasun ja biometaanin tuotantoon liittyviä parametreja, joita eri tutkimusalojen asiantuntijat pitivät merkittävimpinä biokaasun ja biometaanin tuotannon kannalta. Merkittävimmäksi yksittäiseksi tekijäksi osoittautui *methane slip*, joka tarkoittaa biometaanin tuotannossa ja käytössä hyödyntämätöntä, mutta päästöksi päätyvää tuotettua metaania. Esimerkiksi ottomoottorit päästävät noin 5 g/kWh palamattomaa metaania pakokaasujen mukana ulos, joka vastaa noin 2 prosenttia moottorin kokonaiskulutuksesta [5]. Vaikka metaanin palaminen on muuten puhtaampaa verrattuna esimerkiksi polttoöljyyn, metaanivuotojen minimointi on tulevaisuudessa tärkeässä asemassa, jotta käytön kokonaispäästöt saadaan mahdollisimman pieniksi.

### 3. SYNTEETTISEN BIOMETAANIN TUOTANTO

Syntheettisellä biometaanilla tarkoitetaan kaasuseosta, joka sisältää 98-99% metaania, 1-2% hiilidioksidia sekä pienen määrän vetyä. Se tuotetaan termokemiallisesti hiilipitoisista raaka-aineista ja kemialliselta koostumukseltaan vastaa fossiilista maakaasua [43,60]. Kaasu on uusiutuva energianlähde, jos se tuotetaan uusiutuvasta raaka-aineesta, kuten puubiomassasta. Syntheettisellä biometaanilla on energiantuotannon lisäksi muitakin käyttökohteita, esimerkiksi kemianteollisuudessa ja liikennepolttoaineena. Biometaania pidetään myös potentiaalisena vaihtoehtona energian varastointiin tasoittamaan uusiutuvan energian tuotannon ja kulutuksen välistä ajallista eroa.

Suomessa ei ole vielä yhtään syntheettistä biometaania tuottavaa laitosta. Valtionyhtiö Gasum on arvioinut, että Suomessa olisi mahdollista tuottaa vuosittain noin 8000 GWh puupohjaista syntheettistä biometaania, joka vastaisi noin kolmannesta vuonna 2016 Suomessa käytetystä maakaasusta. Puun nettokasvua oli Suomessa vuonna 2016 tarpeeksi vastamaan vielä suuremmatkin arviot, ja kasvua on oletettavissa tulevaisuudessa. [15,36]

Tuotannon kannattavuus riippuu vahvasti sen hetkisen maakaasun markkinahinnasta, koska syntheettisellä biometaanilla ja maakaasulla on käytännössä yhteiset markkinat ja käyttökohteet. Asiakkaan tulisi saada jotakin konkreettista hyötyä vaihtaessaan raaka-aineensa maakaasusta biometaanin tai tuottajan tulisi pystyä tuottamaan syntheettistä biometaania maakaasun suhteen kilpailukykyiseen hintaan. Käytännössä jälkimmäinen on edellytys syntheettisen biometaanin tuotannon aloittamiselle, koska tukipolitiikkaa Suomessa syntheettisen biometaanin tuotannolle ei ole.

Ruotsissa syntheettisen biometaanin tuotanto on aloitettu. Kaasun loppukäytöksi on suunniteltu ennen kaikkea liikennepolttoainekäyttö. Syntheettisen biometaanin liikenneloppukäyttö olisi perusteltua myös Suomessa, koska energiantuotantoon biomassoilla on saatavilla omat tariffit, todennetut teknologiat, vakiintuneemmat markkinat sekä pienemmät investointikustannukset johtuen matalammasta jalostusasteesta. Energiatuotanto ei tarvitse yhtä korkeaa kaasun jalostusastetta kuin liikenne- tai teollisuussovelluskäyttö. [13]

Tässä kappaleessa tarkastellaan tällä hetkellä saatavilla olevia kaupallisia ratkaisuja syntheettisen biometaanin tuotantoon sekä niiden peruseräiteitä. Puubiomassan kaasutusta on tutkittu paljon, mutta tällä hetkellä maailmalla olevat kaasutusteknologiat keskittyvät silti suurimmaksi osaksi fossiilisten raaka-aineiden, kuten kivihiilen, kaasutukseen. Myös synteetikaasun jatkojalostus puhtaaksi metaaniksi on vielä käytännön tasolla haasteellista. Kaupallisen kannattavuuden kannalta puubiomassan hankintakustannusten yhtenäistäminen jonkin toisen puubiomassaa käyttävän prosessin kannalta olisi myös merkittävää. Tiedetyt prosessit, kuten sellun tuotanto, voisivat myös toimia symbioosissa syntheettisen biometaanin tuotannon kanssa.

### 3.1 Synteesikaasun tuotanto

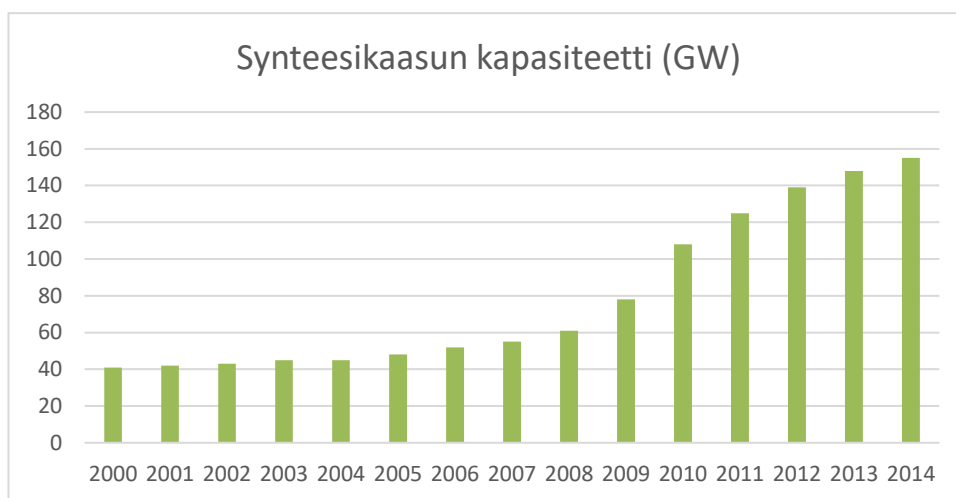
Synteesikaasulla tarkoitetaan korkean lämpöarvon omaavaa kaasuseosta, joka syntyy, kun kaasutettava hiilipitoinen raaka-aine reagoi korkeassa lämpötilassa joko hapen, vesihöyryn tai näiden sekoituksen kanssa. Taulukossa 3.1 on kuvattu eri kaasuttavilla aineilla tuotetun synteesikaasun lämpöarvoja. Erona polttamiseen on se, että kaasutettavan raaka-aineen ei anneta reagoida täyden palamiseen tarvittavan happimäärän kanssa. Kaasutuksessa käytetty raaka-aine hajoaa synteesikaasuksi sekä kiintoaineiksi, joita kutsutaan tavaksi ja tuhkakksi. Kaasutukseen tarvittava korkea lämpötila saadaan polttamalla jäljelle jäänyt kiintoaine erillisessä polttokammiossa. Kaasuttamalla saadun synteesikaasun koostumus riippuu käytetystä kaasusta, raaka-aineesta sekä kaasutuslämpötilasta, mutta sen pääkomponentit ovat yleisesti hiilimonoksidi CO, vety H<sub>2</sub>, hiilidioksidi CO<sub>2</sub> sekä metaani CH<sub>4</sub>. [27]

**Taulukko 3.1.** Kaasutusprosesseissa käytetyn kaasuttavan aineen vaikutus synteesikaasun teholliseen lämpöarvoon  $q_t$ . [17]

<i>Kaasut-tava aine</i>	$q_t$ [kWh/Nm <sup>3</sup> ]	$q_t$ [MJ/Nm <sup>3</sup> ]	<i>Soveltuvuus eri käyttötarkoituk-siin</i>
<i>Ilma</i>	1,10-1,95	4-7	Energiantuotanto tuotantopaikalla
<i>Happi</i>	2,7-5	10-18	Energiantuotanto, jalostus bio-polttoaineiksi
<i>Vesihöyry</i>	3,9-5	14-18	Energiantuotanto, jalostus bio-polttoaineiksi, korkea H <sub>2</sub> -pitoi-suus synteesikaasuun

Kuva 3-1 kuvaa kaasutusteknologian yleistymistä maailmalla 2000-luvulla, joka on ollut voimakasta. Syynä tähän on ollut öljyn hinnan kallistuminen vuosina 2005-2015 sekä Intian ja Kiinan kasvava energiantarve. Maailmanlaajuisesti eniten kaasutettu raaka-aine on kivihiili. Synteesikaasun käyttö kaasuturbiineissa johtaa parempaan sähköntuotannon hyötysuhteeseen kuin kivihiilen poltto sellaisenaan lämpökattilassa höyryturbiinia varten. Vuoden 2015 jälkeen öljyn hinta romahti vuoden 2004 tasolle. [21]





**Kuva 3-1.** Synteesikaasun asennettu tuotantokapasiteetti maailmanlaajuisesti 2000-luvulla (suunnitellut sekä rakennetut laitokset). [21]

Kaasutusteknologia mahdollistaa monen eri raaka-aineen konversion moneksi eri lopputuotteeksi. Liitteessä 2 on kuvattu viittä eri raaka-ainetta hyödyntävää kaasutusprosessia ja niiden mahdollisia lopputuotteita. Synteettisen biometaanin tuotannon kannalta merkittävää on, että biomassaa voidaan muuttaa myös moneksi muuksi näistä tuotteista joko suoraan tai välillisesti tai sitä voidaan tuottaa myös muista raaka-aineista kuin biomassasta, kuten esimerkiksi jätteistä. Suomessa on ollut nestemäisten biopolttoaineiden tuotantohankkeita perustuen kaasutukseen ja *Fischer-Tropsch* –prosessiin. [21]

Suomessa Lahti Energia ja Vaskiluodon Voima ovat ottaneet käyttöön energiajätteen kaasutukseen perustuvat voimalaitokset. Lahti Energian Kymijärvi ii-kaasutusvoimalaitoksen ainoana polttoaineena on juurikin palava, lajiteltu ja kerätty yhdyskunta- ja teollisuusjäte. Suunnitteilla on myös puubiomassaa pääpolttoaineena käyttävä 200 MW monipolttoainevoimalaitos. [29]

### 3.1.1 Kaasutuksen termodynamiikka ja reaktiokinetiikka

Kuvailtaessa mitä tahansa kemiallista reaktiota, on oleellista kuvailla reaktion termodynamiikkaa sekä reaktiokinetiikkaa. Tällä tarkastelulla selvitetään prosessin lopputila annetuilla reunaehdoilla sekä reitti, jota prosessi menee sinne ja kuinka nopeasti se tapahtuu. Kaasutusprosessit tapahtuvat yleensä yli 850 celsiusasteen lämpötilassa, riippuen käytetyn raaka-aineen ominaisuuksista ja halutusta synteesikaasun koostumuksesta. Alle tämän lämpötilan reaktiot ovat pyrolyysireaktioiden alueella, joiden mallintaminen on todella vaikeaa, sekä reaktiot tapahtuvat niin hitaasti, että näiden käytännöllinen merkitys vähenee. [21] Taulukossa 3.2 kuvataan kiinteän aineen kaasutuksessa tapahtuvat kemialliset reaktiot ja niiden entalpiat.

**Taulukko 3.2.** Kiinteän aineen kaasutuksessa tapahtuvat reaktiot. [17]

Reaktio	Entalpia [MJ/kmol]	Nimi
<b>Hiilen palaminen</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>C_2(s) + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO</math></li> <li>- <math>C(s) + O_2 \rightarrow CO_2</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- -111</li> <li>- -394</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Osittainen palaminen</li> <li>- Täydellinen palaminen</li> </ul>
<b>Koksin kaasuuntuminen</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>C(s) + CO_2 \rightarrow 2CO</math></li> <li>- <math>C(s) + H_2O \rightarrow CO + H_2</math></li> <li>- <math>C(s) + 2H_2 \rightarrow CH_4</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- +173</li> <li>- +131</li> <li>- -75</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Boudouard-reaktio</li> <li>- Höyrykaasuuntuminen</li> <li>- Vetykaasuuntuminen</li> </ul>
<b>Homogeenisten haihtuvien (volatiles) hapettuminen</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2</math></li> <li>- <math>H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O</math></li> <li>- <math>CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O</math></li> <li>- <math>CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- -283</li> <li>- -242</li> <li>- -283</li> <li>- -41</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hiilimonoksidin hapettuminen</li> <li>- Vedyn hapettuminen</li> <li>- Metaanin hapettuminen</li> <li>- Vesikaasureaktio</li> </ul>
<b>Tervan reaktiot (terva <math>C_nH_m</math>)</b>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>C_nH_m + \frac{n}{2} O_2 \rightarrow nCO + \frac{m}{2} H_2</math></li> <li>- <math>C_nH_m + nCO_2 \rightarrow \frac{m}{2} H_2 + 2nCO_2</math></li> <li>- <math>C_nH_m + nH_2O \rightarrow \left(\frac{n}{2} + n\right) H_2 + nCO_2</math></li> <li>- <math>C_nH_m + (2n - \frac{m}{2}) H_2 \rightarrow nCH_4</math></li> <li>- <math>C_nH_m \rightarrow \frac{m}{4} CH_4 + (n - \frac{m}{4}) C</math></li> </ul>	Vahvasti endotermisiä reaktioita:  +200 –  +300	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Osittainen palaminen</li> <li>- Kuivareformointi</li> <li>- Höyryreformointi</li> <li>- Hydraus</li> <li>- Terminen krakkaus</li> </ul>

Kaasutuksen termodynaaminen mallintaminen on tärkeää niin laitoksen suunnittelijalle kuin operaattorille. Tuotetun synteesikaasun koostumus riippuu monesta eri asiasta, ja sen lopullinen jakauma on tärkeää saada oikeanlaiseksi ennen kaikkea, jos synteesikaasu tuotetaan vastaamaan tietyn komponentin tai komponenttien tarvetta. Mallit pohjautuvat termodynamiikan lakeihin, massa- ja energiataseisiin sekä prosessisuureisiin kuten lämpötilaan ja paineeseen. Käytetyn raaka-aineen koostumus on myös tiedettävä tarkasti. [21]

Kaasutuksessa muodostuvat tuotteet riippuvat pääosin käytetystä kaasuttavasta aineesta sekä prosessityypistä, pääasiallisesti siitä, että onko kaasuttavana aineena happi vai höyry. Tuotetun kaasun haluttua koostumusta voidaan säätää myös kaasuttimen jälkeen, koska kaasuttimen sisäinen säätö voi olla vaikeaa tai tietyissä tapauksissa jopa mahdollista. [21]

Reversiibleille reaktioille voidaan määrittää tasapainovakio  $K_p$  yhtälön (3.2) mukaisesti, jossa on määritetty vesikaasureaktion tasapainovakio:

$$K_p = \frac{[CO_2][H_2]}{[CO][H_2O]} = \frac{p_{CO_2} p_{H_2}}{p_{CO} p_{H_2O}} = \frac{v_{CO_2} v_{H_2}}{v_{CO} v_{H_2O}}. \quad (3.2)$$

Tasapainovakio  $K_p$  riippuu lämpötilasta, sekä se kertoo, että kuinka paljon reaktio on siirtynyt suhteellisesti tuotteiden puolelle. Reaktiossa olevat kaasut voidaan olettaa ideaaliksi, koska reaktiot tapahtuvat korkeassa lämpötilassa, joka on kaukana kaasujen kriittisestä pisteestä. Tasapainovakioiden avulla voidaan määrittää kaasuttimessa syntyvän synteesikaasun koostumus olettaen, että reaktiot ovat saavuttaneet tasapainon. [21]

Kaasuttimen energiatase on yleisessä tapauksessa yhtälöparin (3.3) mukainen:

$$\begin{cases} E_{\text{sisään}} = E_{\text{kuiva pa}} + E_{\text{vesi}} + E_{\text{kaasu}} + E_{\text{kiertokaasu}} \\ E_{\text{ulos}} = E_{\text{synteesikaasu}} + E_{\text{terva}} + E_{\text{hiili}} + E_{\text{tuhka}} + E_{\text{häviöt}} \end{cases} \quad (3.3)$$

Kaasutukseen liittyvä *Cold gas efficiency*  $CGE$  kuvaa kaasutuksessa syntyvän tuotekaasun ja käytetyn raaka-aineen energioiden suhdetta [22]:

$$CGE = \frac{q_{s,g} V_g}{q_{s,f}}, \quad (3.4)$$

jossa  $q_{s,g}$  on synteesikaasun ylempi lämpöarvo yksikössä  $[MJ/Nm^3]$ ,  $q_{s,f}$  raaka-aineen ylempi lämpöarvo yksikössä  $[MJ/kg]$  ja  $V_g$  tuotekaasun tilavuus yksikössä  $[Nm^3/kg]$  raaka-ainetta. Tuotekaasun ylempi lämpöarvo [22] voidaan laskea kaavan (3.5)

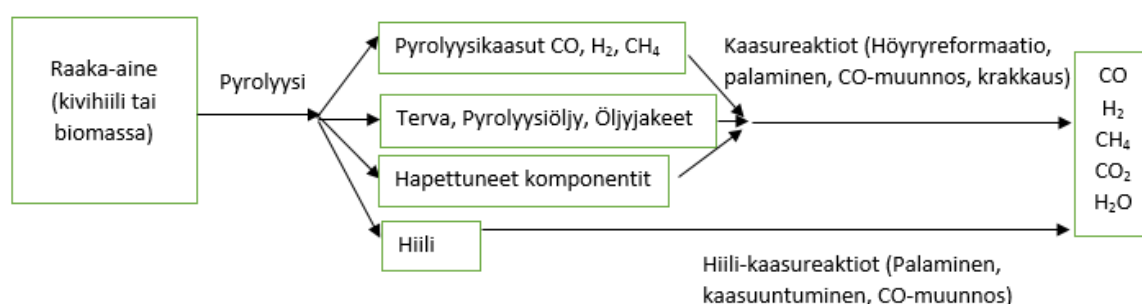
$$q_{s,g} = 12,75y_{H_2} + 12,63y_{CO} + 39,82y_{CH_4} + 25,105y_{H_2S} \quad (3.5)$$

mukaan, jossa  $y_n$  on komponentin  $n$  mooliosuus synteetikaasussa.  $V_g$  määritetään kaavan [22]

$$V_g = (n_{H_2} + n_{CO} + n_{CH_4} + n_{H_2S}) \frac{V_m}{m_f} \quad (3.6)$$

mukaan, jossa  $n_n$  on synteetikaasun komponentin  $n$  ainemäärä,  $V_m$  ideaalikaasun tilavuus 22,4 l/mol sekä  $m_f$  raaka-aineen kuivapaino.

Kaasutuksen kinetiikkaa tutkitaan jatkuvasti, eikä kaikkia reaktioiden välivaiheita vielä tunneta tarkasti. Kuvassa 3-2 on kuvattu kivihiilen ja biomassan konversiota synteetikaasuksi sekä siihen liittyviä välivaiheita.



**Kuva 3-2.** Kaasutukseen liittyvät tärkeimmät välivaiheet ja välituotteet. Kuvassa olevaa hiiltä kutsutaan myös koksiksi. [21]

Kaasutuksen reaktionopeus riippuu vahvasti kemiallisesta kinetiikasta. Merkittävin tekijä on raaka-ainehiukkasten sisäinen aineensiirto, joka riippuu eniten aineen huokoisuudesta, joka taas riippuu raaka-aineesta, tuhkaostumuksesta sekä kaasutusprosessin pyrolyysivaiheen lämmöntuonnista. Heterogeenisten reaktioiden kinetiikkaan vaikuttaa myös aineen- ja lämmönsiirron nopeus. [44]

### 3.1.2 Tuotantoon käytetyt syötteen

Maailmalla synteetikaasun tuotantoon käytetyin syöte on kivihiili. Kivihiilen käytön yleistymistä verrattuna muihin fossiilisiin polttoaineisiin on nostanut sen tasaisemmin jakautuneet sekä suuremmat varastot. Kivihiiltä on arvioitu riittävän nykyisellä kulutuksella noin 2-3 kertaa pidempään kuin öljyä tai maakaasua. Euroopassa kivihiilen käyttö sähkön tuotantoon kasvoi hetkellisesti Saksan luovuttua ydinsähkön tuotannosta, mutta on sittemmin vähentynyt uusiutuvien energiamuotojen yleistyessä. Etelä-Afrikkalainen Sasol Synfuels tuottaa eniten, noin puolet, maailmassa tuotetusta kivihiilipohjaisesta synteetikaasusta, josta se jalostaa liikennepolttoaineita sekä muita kemianteollisuuden tuotteita. Kaasutuksen raaka-aineeksi sopisi myös turve. [21]

Neste- ja kaasumaisia syötteitä käytetään tuottamaan määrällisesti noin sama määrä synteesikaasua kuin kivihiiltä. Näistä merkittävimpiä ovat öljynjalostuksen yhteydessä muodostuvat jäännöshiilivedyt. Tärkeimmät tuotteet, joita näistä fluidimaisista syötteistä tuotetaan, ovat ammoniakki sekä metanoli. Energiantuotanto käyttäen IGCC-kaasutus-kombiteknikkaa on myös yleistymässä. Suomessa maakaasua käytetään teollisuussovelluksissa paljon, noin puolet vuosittaisesta kulutuksesta. [21,44]

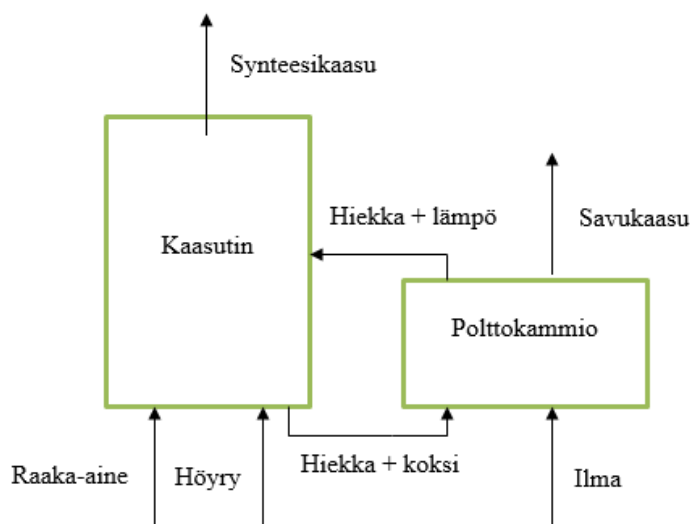
Biomassan käyttö synteesikaasun tuotantoon on ollut vähäistä. Syitä tähän ovat olleet biomassan kaasutuksen käytännön vaikeus, kaupallisesti saatavien toimivien teknologioiden puute sekä kannattavien jalostustuotteiden kysynnän puute. Suomessa biomassan käyttö on keskittynyt enemmän lämmön tuotantoon sekä CHP-voimalaitosten polttoainekäyttöön esimerkiksi turpeen kanssa yhtäaikaaisesti. Biomassojen käyttöä hankaloittaa sen poltossa ja kaasutuksessa muodostuvan tuhkan alhainen sulamispiste, muodostuva terva ja kemiallinen koostumus, joka aiheuttaa prosessilaitteiston lämpöpintojen kuonaantumista. Biomassoiksi määritellään yleensä kaikki orgaanista alkuperää olevat kasvi- ja metsäjätteet, energiakäyttöön kasvatetut kasvit sekä yhdyskunta- ja teollisuusjätteet ja sivuvirrat. Suomalaisittain merkittävät biomassat ovat puuhake sekä sellu- ja paperiteollisuudessa muodostuva mustalipeä. Taulukkoon 3.3 on koottu eri raaka-aineista ja kaasuista tuotettuja synteesikaasujen koostumuksia. [21]

**Taulukko 3.3.** Eri syötteillä ja kaasutusprosesseilla tuotetun synteesikaasun kokeellisia koostumuksia. Koostumukset esitetty muodossa %-kuiva-aineesta. [21,27]

	Puupelletti	Metsähake	Turve	Kivihiili
Koetyyppi	$O_2 + H_2O$	$O_2 + H_2O$	Höyry	$O_2$
Alkuainekoostumus				
- C	- 50,7	- 51,3	- 51,0	- 74,6
- H	- 6,20	- 6,10	- 5,60	- 5,20
- N	- 0,10	- 0,50	- 0,90	- 1,60
- O	- 42,8	- 39,5	- 39,4	- 9,00
- S	- 0,01	- 0,05	- 0,16	- 1,00
- Tuhka	- 0,20	- 2,60	- 2,90	- 8,60
Synteesikaasun koostumus				
- CO	- 22,5	- 19,7	- 19,4	- 63,4
- CO <sub>2</sub>	- 31,9	- 35,0	- 21,5	- 0,00
- H <sub>2</sub>	- 25,1	- 26,2	- 52,8	- 34,3
- CH <sub>4</sub>	- 9,20	- 8,90	- 5,30	- 0,01
- Muut	- 11,3	- 10,2	- 1,00	- 2,20

### 3.1.3 Yleiset kaasutusprosessit

Kaasutusprosessit jaetaan yleisesti kolmeen eri kategoriaan: kiinteäkerroskaasuttimet, leijukerroskaasuttimet sekä pölyvirta- tai suspensiokaasuttimet. Näistä kaasuttimista on olemassa erilaisia variaatioita, joissa yleisimmät muutokset liittyvät raaka-aineen ja kaasuttimen ainevirtausten keskinäiseen suhteeseen. Kiinteän polttoaineen kaasutustavat jaetaan myös lämmöntuonnin suhteen kahdella eri tavalla auto- ja allotermiseen kaasutukseen. Autotermisessä kaasutuksessa osa raaka-aineesta reagoi eksotermisesti kaasuttimessa olevan hapen kanssa kaasutusvyöhykkeessä. Allotermisessä kaasutuksessa reaktioihin tarvittava energia tuodaan kaasuttimeen ulkopuolelta, esimerkiksi jonkin väliaineen avulla. Allotermistä kaasutusta kutsutaan myös epäsuoraksi kaasutukseksi. Ulkoinen energiantuonti on tarpeen silloin, kun kaasuttavana aineena on vesihöyry, koska tällöin osittaiseen palamiseen tarvittavaa happea ei ole saatavilla. Biomassaa kaasutettaessa kaasuttimet ovat yleensä allotermisiä. [17,21,37,44]

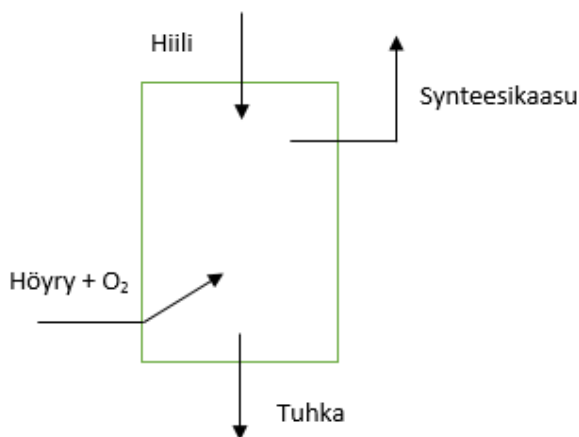


**Kuva 3-3.** Allotermien kaasutusprosessi. [17]

Kuvassa 3-3 on kuvattu allotermien kaasutusprosessi, jossa kaasutukseen tarvittava lämpöenergia tuotetaan polttamalla kaasutuksesta jäljelle jäävä kiintoaine, koksi, erillisessä polttokammiossa. Palamisessa tuotettu lämpö sitoutuu hiekkaan, joka johdetaan takaisin kaasuttimeen. Lämpö voitaisiin tuottaa myös muilla menetelmillä, kuten kiertämällä osa tuotetusta synteesikaasusta polttokammioon poltettavaksi, tai käyttämällä jotain muuta ulkoista lämmönlähdettä. [17,21]

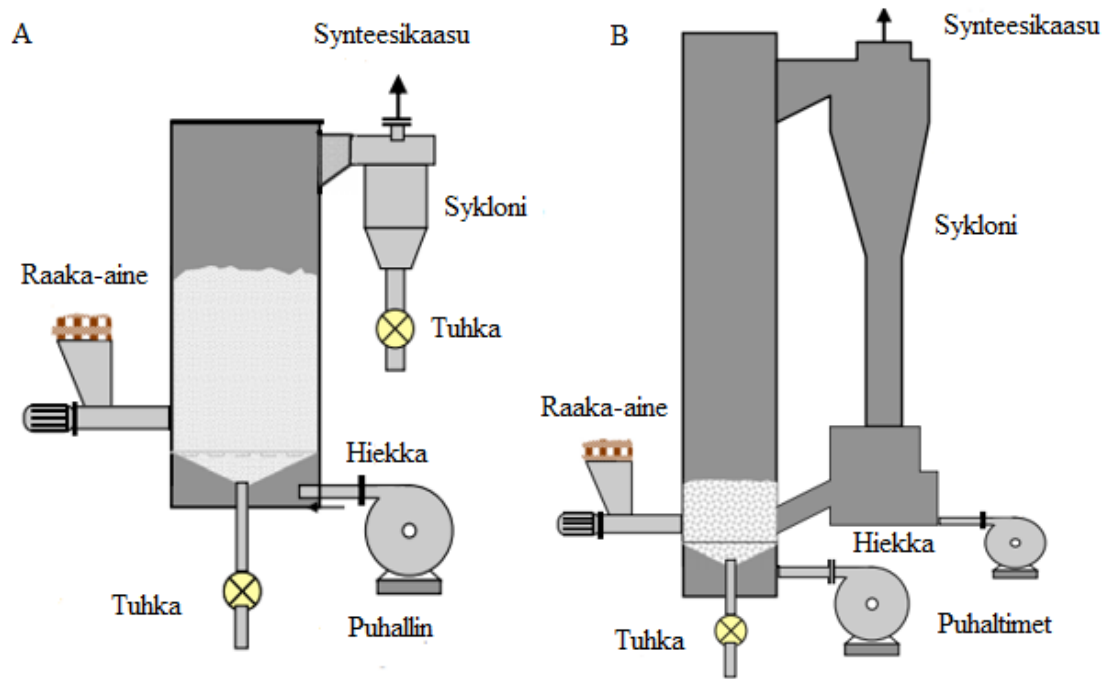
Kaasutus tapahtuu yleensä paineistetussa tilassa. Kaasutintyyppien väliset erot sekä käytetty kaasuttava aine asettavat vaatimuksia käytetylle painetasolle. Paineistettu kaasutus johtaa myös pienempiin investointikustannuksiin pienentyneen prosessilaitteiston koon sekä pienentyneen synteesikaasun kompressiotarpeen vuoksi. Käytettäessä vesihöyryä kaasuttavana aineena höyryn tulee olla tulistettua, jottei höyrystä tule märkää kaasuttimen sisällä, joka johtaisi lisääntyneeseen tervan muodostumiseen. [17,21]

Kiinteäkerroskaasuttimia kuvaa se, että niissä raaka-aine valuu kaasuttimen yläosasta painovoiman vaikutuksesta alaspäin. Käytetty kaasuttava aine tulee yleensä kaasuttimen alaosaan, vastakkaisesta suunnasta kuin raaka-aine. Tällainen vastavirtaus johtaa siihen, että kaasuttimessa muodostuva kuuma synteesikaasu esilämmittää ja aloittaa alas valuvan raaka-aineen pyrolyysivaiheen. Prosessi ei käytä paljoa kaasuttavaa happea, mutta synteesikaasun joukkoon jää pyrolyysituotteita, kuten tervaa ja kiintoaineita. Kaasuttimen lämpötila-alue on yleensä 800-1000 °C, painealue 10-100 bar. Tuotetun synteesikaasun lämpötila jää alhaiseksi, mutta kaasuttimen keskiosilla tuhka voi silti olla sulaa. Kiinteäkerroskaasutusta on hankala soveltaa suuren mittakaavan prosessiin, koska leveä kaasutin vaikeuttaa tasaisen hiilikonversion ylläpitoa. Prosessissa raaka-aineena on yleensä hiili. Käytetyn kivihiilen raekoko on huomattavasti suurempi kuin muissa kaasutustekniikoissa, jopa 30mm. Kuvassa 3-4 on kuvattu kaasutustekniikan perusratkaisu. Mikäli hiili syötetään kaasuttimeen sen alaosaan, tuotetun synteesikaasun pyrolyysituotteiden pitoisuus jää alhaisemmaksi. [17,21,44]



**Kuva 3-4.** Kiinteäkerroskaasutuksen perusratkaisu. [44]

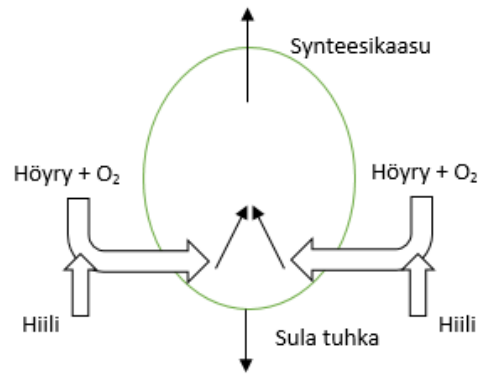
Leijukerroskaasuttimet ovat hyvin samankaltaisia vastaavien polttotekniikoiden kanssa. Niissä kaasuttava aine sekoittuu tehokkaasti kaasutettavaan raaka-aineeseen, joka takaa hyvän aineen- ja massansiirron. Hiilen konversioaste asettuu yleensä rajoittavaksi tekijäksi, koska osittain kaasuuntunutta hiiltä päätyy aina tuhkan mukana ulos kaasuttimesta. Kaasuttimen lämpötilat määräytyvät käytetyn raaka-aineen tuhkan sulamispisteen mukaan, koska leijukerrosksen toiminta häiriintyy kuonaantumisen vuoksi. Paine-taso kaasuttimissa on yleensä 10-25 bar. Raaka-aineen raekoko on oltava tarkka, koska liian pienet partikkelit ohivirtautuvat muodostuvan synteesikaasun mukana pois kaasutimesta. Matalan lämpötilatason leijukerroskaasuttimia käytetään matalan lämpöarvon hiilen sekä biomassan kaasutukseen sekä ne sopivat hyvin eri kokoluokkiin. Synteesikaasu johdetaan kaasuttimen jälkeen sykloniin, jossa käytetty petimateriaali ja kaasussa olevat partikkelit poistetaan. Kuvassa 3-5 on kuvattu kaksi leijukerroskaasutinta, perinteinen leijukerroskaasutin ilman kiintoainekiertoa sekä kiertoleijukaasutin. [21,44]



**Kuva 3-5.** Leijukeroskaasuttimet. *Bubbling Fluidized Bed A, kierto-leijukaasuttimen Circulating Fluidized bed B. Kuva muokattu lähteestä [17].*

Pölyvirtakaasuttimissa, Entrained flow gasifier, kaasuttava aine sekoitetaan hienonnettuun raaka-aineeseen, esimerkiksi hiilipölyyn, ennen kaasuttimeen tuloa. Niissä raaka-aine ja kaasuttava aine ovat aina samansuuntaisessa virtauksessa, ja lämpötilat ovat selkeästi muita kaasuttimia korkeampia, jopa 1500-1900 °C, johtuen lyhyestä reaktioajasta kaasuttimessa. Pölyvirtakaasuttimista käytetään myös nimeä suspensiokaasutin. Korkea lämpötila johtaa siihen, että tuhka on aina sulaa, sekä kaasutin tarvitsee enemmän happea kuin muut tyypit. Tervan määrä tuotetussa synteesikaasussa on hyvin vähäinen korkean konversioasteen johdosta. Biomassan käyttö pölyvirtakaasuttimessa on haasteellista johtuen tarkasta raaka-aineen raakoosta, johon pääseminen taloudellisesti järkevään hintaan on hankalaa. Myös biomassasta syntyvä korkea alkalipitoisuuden omaava sula tuhka aiheuttaa kuumakorroosiota kaasuttimen pinnoille valuessaan kaasuttimesta pois. Kuva 3-6 kuvaa pölyvirtakaasuttimen toimintaa. Kivihiiltä käytettäessä tuotetun kaasun teho saadaan usean sadan megawatin tasolle. Myös mustalipeän kaasutusta suspensiokaasuttimessa on tutkittu, ja kaupallisia Chemrec-kaasuttimia on markkinoilla. [17,21,44]

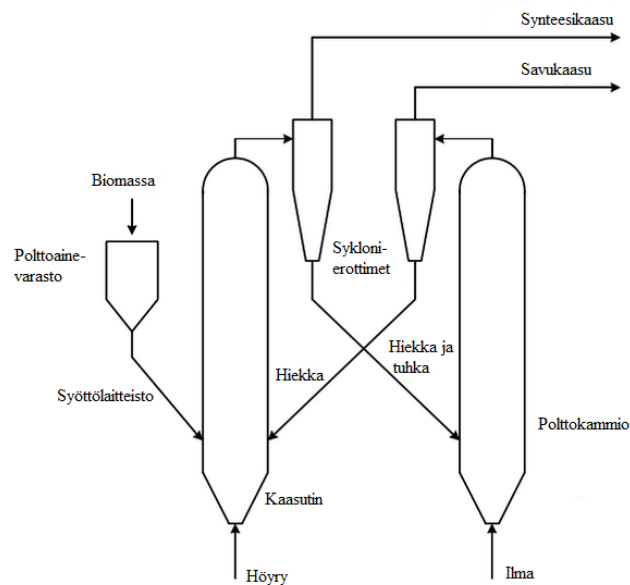




**Kuva 3-6.** Pölyvirtakaasuttimen perusratkaisu. Muokattu lähteestä [44].

### 3.1.4 Biomassan kaasutus

Biomassan kaasutuksella on paljon samankaltaisuuksia kivihiilen kaasutuksen kanssa. Kaasutuksen suurin ero verrattuna kivihiilen kaasutukseen on tuhkan sulamispiste ja sen käyttäytyminen sulassa olomuodossa. Biomassan kaasutuksessa syntyy myös enemmän tervaa. Biomassan kaasutukseen liittyvä kaasutinrakenne ulkoisella lämmöntuotannolla on kuvattu kuvassa 3-7. [17,21]



**Kuva 3-7.** Biomassan kaasutukseen käytettävä epäsuora kiertoileijukaasutin. Kuva muokattu lähteestä [21].

Kiinteäkerroskaasuttimia on käytetty suuremman raekoon puun kaasutukseen, mutta muun tyyppiset biomassat eivät sovellu tähän ratkaisuun. Lisäksi virtauksen tulisi olla samansuuntainen kaasuttavan höyryn kanssa, koska vastakkainen virtaus biomassaa käytettäessä johtaisi liian suureen synteesikaasun tervapitoisuuteen. Tämä kuitenkin rajoittaa

kaasuttimen tehon matalaksi. Teknisesti varteenotettavin vaihtoehto onkin käyttää leijukerrosteknologiaa ja yhdistää siihen hyvät puhdistustekniikat tervan poistoon tai hyödyntämiseen. Mikäli biomassaa käytetään yhdessä fossiilisen polttoaineen kanssa, tervan aiheuttamat ongelmat prosessilaitteistoon voidaan kiertää pitämällä kaasun lämpötila tervan kastepisteen yläpuolella.

Tuotetun synteetikaasun koostumus riippuu vahvasti käytetystä kaasuttavasta aineesta. Mikäli kaasutukseen käytetään ilmaa, ilman mukana oleva typpi päätyy synteetikaasun mukaan, mikä heikentää sen lämpöarvoa sekä täytyy poistaa, mikäli synteetikaasua on tarkoitus jatkojalostaa biopolttoaineiksi. Liitteessä 3 on Teknologian tutkimuskeskus VTT:n tekemän tutkimuksen tuloksia mäntypurun kaasutuksesta käyttäen leijukerrosteknologiaa. [23,27]

### 3.1.5 Synteetikaasun puhdistus ja reformointi

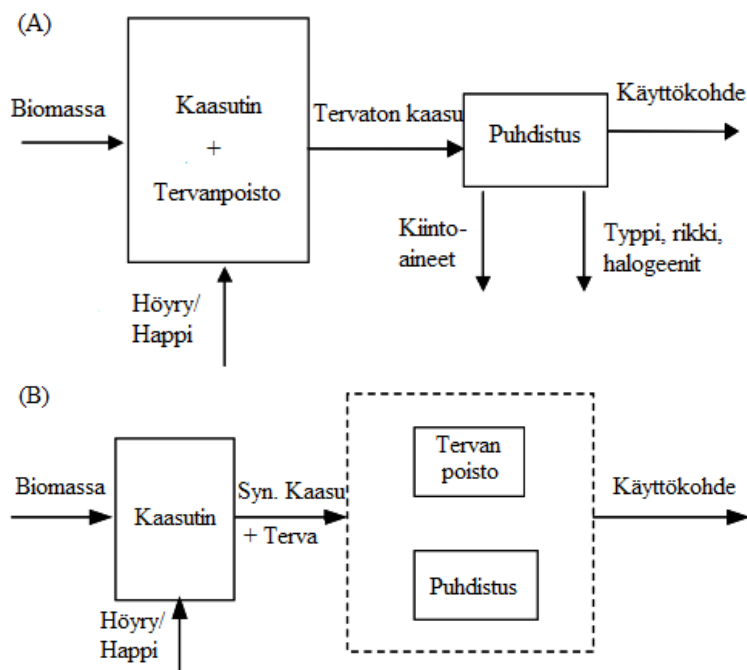
Tuotettu synteetikaasu täytyy puhdistaa samalla tavoin kuin raaka biokaasu ennen sen loppukäyttöä. Puhdistuksen tarkkuus ja siihen liittyvät komponentit riippuvat kaasun käyttökohteesta, yleisesti kemianteollisuuteen tai biopolttoainetuotantoon tarkoitettu synteetikaasu täytyy puhdistaa tarkemmin. Eri raaka-aineilla tuotetun synteetikaasun puhtaus vaihtelee. Yleisesti ottaen tärkeimmät kohteet kaasun puhdistuksessa ovat rikin- ja tervanpoisto. Puhdistusta vaikeuttaa se, että tietyissä applikaatioissa jokin kaasun komponentti luetaan epäpuhtauksiksi ja jossain se on haluttu, jolloin puhdistusjärjestelmän on oltava selektiivinen. Myös olosuhde, jossa kaasun puhdistus tapahtuu, on merkittävä etenkin käytettäessä synteetikaasua energian tuotantoon: kaasun viilentäminen ennen puhdistusta aiheuttaa häviöitä. [10,21]

Absorptiomenetelmillä voidaan poistaa rikki tehokkaasti. Menetelmä perustuu kaasun pesemiseen nestemäisellä liuottimella, joka selektiivisesti poistaa halutut epäpuhtaudet synteetikaasusta. Yleensä nesteeseen liukenee rikkivety  $H_2S$  sekä hiilidioksidi  $CO_2$ . Neste voidaan kierrättää takaisin pesuriin sen regeneroinnin jälkeen. Yleisesti käytettyjä liuoksia ovat veteen liuotetut amiini- sekä kaliumkarbonaattiliuokset. [21]

Adsorptiomenetelmät perustuvat kaasussa olevien epäpuhtauksien sitomista kiinteään materiaaliin adsorption avulla. Rikinpoistoon käytetty adsorptiomateriaali on yleensä sinkkioksidia, jolle ei ole taloudellisesti kannattavaa regenerointimahdollisuutta, ja se on vaihdettava tasaisin väliajoin. Adsorption tehokkuuteen vaikuttavat synteetikaasun ja adsorptiopedin koostumuksen lisäksi paine ja lämpötila. Isotermistä paineenvaihtelu-adsorptiota PSA käytetään etenkin vedyn erotukseen synteetikaasusta. Mitä enemmän synteetikaasussa on epäpuhtauksia, sitä enemmän vetyä menetetään petimateriaaliin niiden mukana. [21]

Etenkin biomassalla tuotettu synteetikaasu sisältää paljon tervaa. Tervan poistoon liittyvien tekniikoiden täytyy poistaa terva tehokkaasti, olla taloudellisesti kannattavia sekä ne

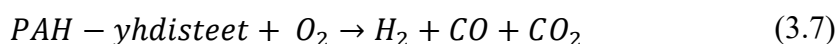
ei saa poistaa synteesikaasusta sen hyödyllisiä komponentteja. Tervan poisto voidaan kehittää kahdella tavalla: kaasuttimen sisällä, primäärimetodi, tai heti kaasuttimen jälkeen, sekundäärimetodi. Se perustuu kahteen eri teknologiaan: termiseen krakkaukseen katalyytin avulla sekä pesuun orgaanisella liuottimella. Kuvassa 3.8 on havainnollistettu poistomenetelmiä. [10,21]



**Kuva 3-8.** Tervanpoiston primääri (A)- ja sekundäärimenetelmät (B). Kuva muokattu lähteestä [10].

Sekundääriset puhdistusmenetelmät ovat yleensä tehokkaita, mutta ovat haitallisia prosessin energiatehokkuuden kannalta. Lisäksi ne vaativat ylimääräisiä komponentteja, jotka vaikuttavat laitoksen kaupalliseen kannattavuuteen niin investointikustannusten kuin käyttökustannustenkin nousuna. Kemianteollisuuden ja biopolttoainetuotannon tarvitsema erittäin puhdas kaasu tarvitsee kuitenkin monimutkaisemman prosessin reformoinnin vuoksi, jolloin molempien metodien hyödyntäminen on hyödyllistä. [10]

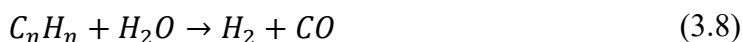
Kaasun reformoinnilla pyritään vaikuttamaan sen sisältämän vedyn ja hiilimonoksidin suhteeseen  $H_2/CO$ . Useimmissa sovelluksissa, kuten synteettisen biometaanin tuotannossa, kaasun sisältämän vedyn maksimointi on tärkeää. Reformoinnilla voidaan myös hajottaa kaasussa olevia tervayhdisteitä, polyaromaattisia hiilivetyjä PAH, synteesikaasun komponenteiksi reaktion (3.7) mukaan:



Teknologian tutkimuskeskuksen VTT:n tutkimusten mukaan zirkoniumkatalyyttien käytöllä termisessä krakkauksessa polyaromaattiset hiilivedyt hajoavat noin 600-900 °C

lämpötilassa konversion ollessa yli 80%. VTT:llä on kansainvälinen patentti zirkoniumkatalyyttien käyttöön. Kaasun vesipitoisuuden kasvun huomattiin vaikuttavan konversiioon negatiivisesti. [27]

Kaasun reformoinnissa kaasussa olevat hiilivedyt sekä hiilimonoksidi reagoivat veden kanssa muodostaen vetyä, hiilimonoksidia sekä hiilidioksidia reaktioyhtälöiden (3.8) ja (3.9) mukaisesti



Reaktiota (3.9) kutsutaan shift-reaktioksi, joka voidaan toteuttaa myös erillään reformoinnista synteesikaasun koostumuksen säätämiseen. Varsinkin biometaanin tuotannossa synteesikaasun  $H_2/CO$ -suhdetta pyritään nostamaan ennen metanointiyksikköä. Reformointi toteutetaan yleensä 600-950 °C lämpötilassa nikkelikatalyytin avulla. Jalo-metallikatalyyteillä päästään kuitenkin korkeampaan hiilivetyjen sekä tervojen konversioon. [27]

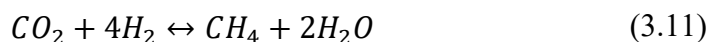
## 3.2 Synteesikaasun konversio biometaaniksi

Synteesikaasun metanointiprosessin tarkoitus on muuntaa synteesikaasu mahdollisimman lähelle fossiilisen maakaasun kemiallista koostumusta. Prosessi integroidaan kaasutusprosessin yhteyteen, mutta metanointi voidaan suorittaa myös muista lähteistä saaduille kaasuille. Synteesikaasun konversiolla voidaan saavuttaa voimalaitoskokoluokan biometaanin tuotantomääriä. Euroopassa biometaanin tuotanto synteesikaasusta on demonstraatiovaiheessa, Ruotsissa ollen kaksi merkittävää hanketta: Bio2G Malmössä, jonka laitoksen on tarkoitus tuottaa biometaania 200 MW sekä Göteborgin energian Go-BiGas-hanke, jonka laitos tuottaa biometaania 120 MW teholla. Laitoksissa on käytetty erilaisia teknisiä ratkaisuja ja kummassakin käytetty teknologia on testattu pienemmän mittakaavan demolaitoksessa. [19,37]

Synteesikaasun tuotanto biometaanin jalostukseen eroaa muista kohteista. Syötteenä käytetään uusiutuvia syötteitä, lähinnä puuperäistä biomassaa, joka asettaa rajoitteita kaasuttimelle sekä puhdistus- ja reformointiprosessille. Suurin rajoittava tekijä on muodostuvan tuhkan sulamispisteen huomiointi. Kaasun on myös oltava erittäin puhdasta, jotta se voidaan syöttää maakaasuverkkoon sekä hyödyntää liikennekäytössä.

### 3.2.1 Metanointi

Synteesikaasussa olevat pääkomponentit hiilimonoksidi, hiilidioksidi sekä vety reagoivat yhtälöiden (3.10) - (3.11) mukaisesti



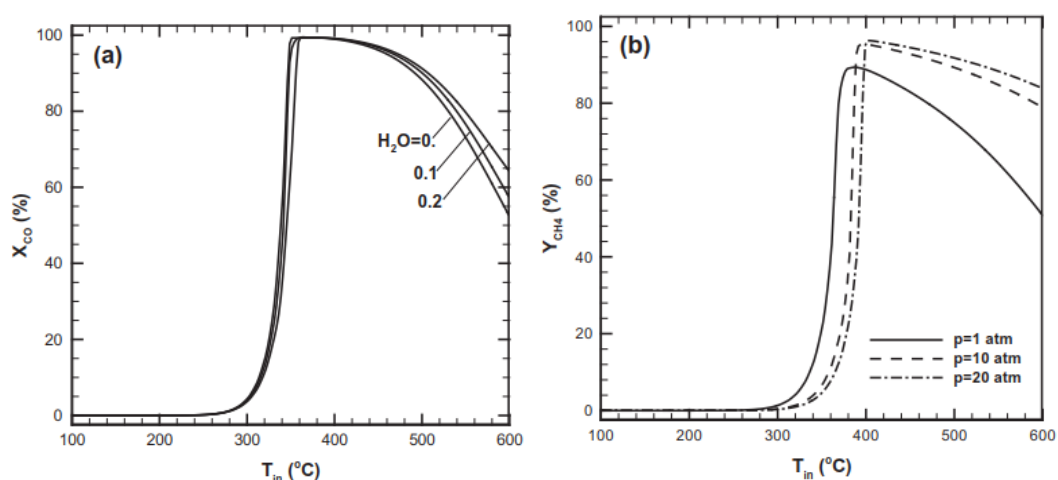
Molemmat reaktiot ovat eksotermisia. Metanointireaktioiden yhteydessä tapahtuu myös shift-reaktiota (3.9). Metanoinnissa syntyvä lämpö johdetaan yleensä talteen osaksi muuta tuotantoprosessia. Reaktiota (3.11) kutsutaan myös Sabatier-reaktioksi sen löytäneen kemistin Paul Sabatierin mukaan. [21]

Reaktiot tarvitsevat katalyytin tapahtuakseen. Katalyytille määrätty vaatimukset ovat korkea aktiivisuus matalassa lämpötilassa, hyvä stabiilius korkeassa paineessa sekä rikkiyhdisteiden sietokyky. Yleisesti katalyytiksi sopivat monet metallit, kuten nikkeli, rutenium, rodium, platina, rauta, nikkeli sekä koboltti. Jalometallit sopisivat hyvin katalyyteiksi tehokkaan metaanituoton kannalta, mutta niiden käyttö ei ole taloudellisesti kannattavaa. Koska nikkeli on selektiivinen, edullinen sekä kestää hyvin rikkiyhdisteitä, se on yleisin metanointiin käytetty katalyytti. Taulukossa 3.4 on kuvattu syitä metanointiin liittyvien katalyyttien deaktivoitumiseen. [8]

**Taulukko 3.4.** Metanoinnissa käytetyn katalyytin deaktivoitumisen mekanismit. Muokattu lähteestä [46].

<i><b>Mekanismi</b></i>	<i><b>Kuvaus</b></i>	<i><b>Syitä sekä merkitys prosessiin</b></i>
<i><b>Myrkytys</b></i>	Katalyytin aktiivisen pinta-alan väheneminen	Rikin kemisorptio katalyyttiin, korroosio
<i><b>Höyry-kiinteä-reaktiot</b></i>	Ei-halutun aineen reaktiot katalyytin kanssa	Haitallisten yhdisteiden muodostuminen
<i><b>Terminen heikentyminen</b></i>	Katalyytin sintrautuminen	Tapahtuu ennen kaikkea adiabaattisissa metanointireaktoreissa
<i><b>Tukkeutuminen</b></i>	Yhdisteiden fyysinen tarttuminen katalyytin pintaan	Tervan tai muiden hiilivetyjen aiheuttama
<i><b>Kuluminen</b></i>	Katalyyttimateriaalin häviäminen mekaanisen hankauksen vuoksi	Kaasun mukana olevat pienhiukkaset/petimateriaali
<i><b>Murskautuminen</b></i>	Katalyytin hajoaminen mekaanisen tai termisen rasituksen vuoksi	Lämpölaajeneminen, paineen vaihtelu

Tutkimuksessa [8] on huomattu, että kuvassa 3-9 kuvattu hiilimonoksidin metanointi on herkkä reaktorin lämpötilalle. Reaktio alkaa noin 300 celsiusasteen lämpötilassa, ja saavuttaa täydellisen konversion noin 380 asteen lämpötilassa. Mikäli lämpötila nousee tästä vielä, konversio laskee kemiallisen tasapainokoostumuksen mukaisesti. Reaktorin on myös oltava isoterminen, sillä adiabaattinen reaktori muutoin samoissa olosuhteissa vaikuttaa laskevasti hiilimonoksidin konversioon vaikuttaen jopa 60 prosentin laskuna. Lisäksi metaanintuoton nostamiseksi synteesikaasun  $H_2/CO$ -suhde tulee nostaa ennen metanointireaktoria shift-reaktion avulla mahdollisimman lähelle stoikiometrista suhdetta 3. Synteesikaasussa oleva vesi nostaa CO-konversiota korkeammilla lämpötiloilla hieman, mutta vaikuttaa haitallisesti pienentämällä metaanituottoa sekä nostamalla  $CO_2$ -pitoisuutta tuotekaasussa.

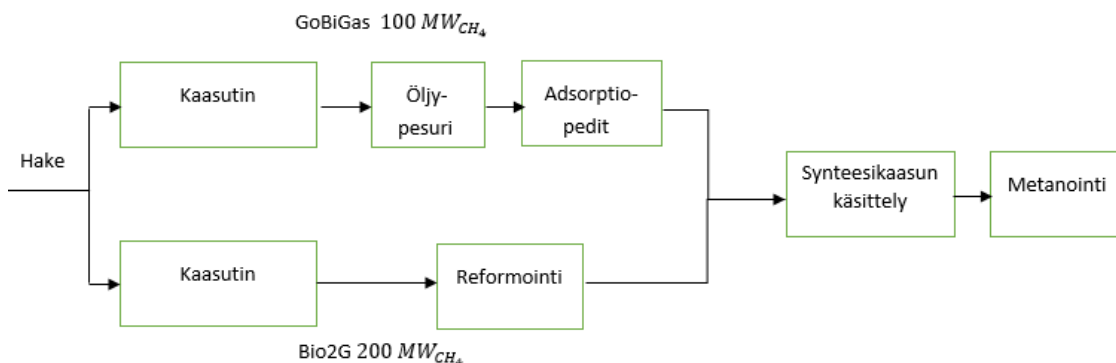


**Kuva 3-9.** Lämpötilan vaikutus synteesikaasun CO-konversioon (a) sekä paineen vaikutus metaanituottoon (b). Käyrät tehty kolmella eri synteesikaasun vesipitoisuudella.

Kuva muokattu lähteestä [8].

### 3.2.2 Biometaanin tuotantoprosessi

Kaksi maailmassa tällä hetkellä suurinta synteettisen biometaanin tuotantolaitosta sijaitsevat Ruotsissa. Näissä käytetyt kaasutus- ja puhdistusprosessit ovat kuvattu kuvassa 3-10. Merkittävimmät prosessitekniset erot ovat kaasuttimen toiminnassa: Bio2G-hankkeen kaasutin käyttää happea kaasuttavana aineena, GoBiGas-projektissa kaasuttavana aineena on höyry. Yksityiskohtaisemmat kuvaukset kummastakin prosessista löytyy liitteistä 5 ja 6. [19,37]



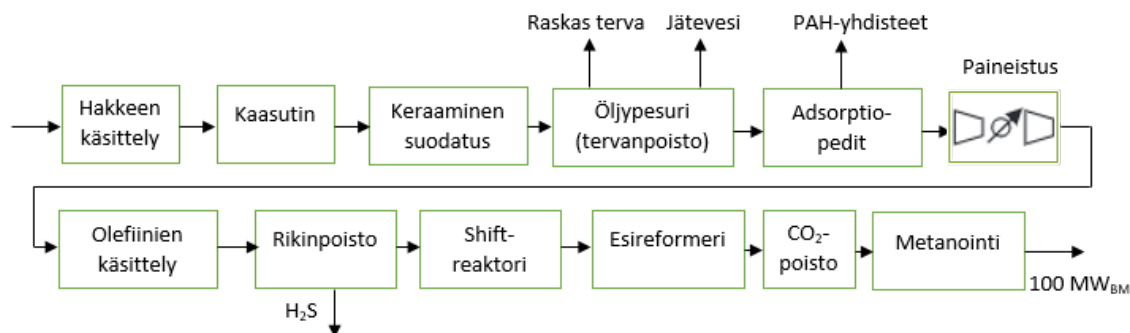
**Kuva 3-10.** GoBiGas- sekä Bio2G –hankkeiden yksinkertaiset prosessikuvaukset. Kuva muokattu lähteestä [19].

Suurimmat esteet synteettisen biometaanin tuotannolle ovat olleet korkeat investointi- ja käyttökustannukset. Tuotannon käyttökustannukset riippuvat vahvasti biomassan hinnasta, joka tarkoittaa sitä, että tuotannon on pyrittävä olemaan mahdollisimman energiatehokasta ja koitettava tarjota jotain lisäarvoa. Kaasuttimen toiminta sekä metanointiin liittyvä lämmön talteenotto on oltava energiatehokasta, jotta tuotanto on kannattavaa. Investointikustannuksia voidaan vähentää yhdistämällä tiettyjä prosessin osia muiden prosessien yhteyteen. [19]

Göteborgin energian GoBiGas-hankkeeseen suunniteltu prosessi perustuu ympäristön paineessa tapahtuvaan allotermiseen kiertoleijukaasutukseen. Kaasutuksen syötteenä voidaan käyttää puupellettiä ja metsähaketta. Kaasuttimessa tuotettu synteesikaasu johdetaan öljypesurille, jossa käytetään rapsiöljy-metyyliesteriä RME nesteinä. Pesussa ra'asta synteesikaasusta poistetaan kiintoaineet sekä raskaat tervat sekä se viilennetään. Polyaromaattiset hiilivedyt, typpi- sekä klooriyhdisteet poistetaan adsorptiolla aktiivihiileen. Tervaton synteesikaasu paineistetaan, jonka jälkeen kaasussa olevat olefiinit muutetaan alkeeneiksi. Rikki konvertoidaan rikkivedyksi  $H_2S$  sekä poistetaan. Tämän jälkeen kaasun  $H_2/CO$ -suhdetta nostetaan shift-reaktorissa ja kaasussa olevat alkeenit muutetaan metaaniksi esireformerissa. Tämän jälkeen kaasu johdetaan neljään sarjaan kytkettyyn adiabaattiseen metanointireaktoriin, joista kaasu on kuivaamisen jälkeen valmis maakaasuverkkoon injektoitavaksi. Prosessin välivaiheet on kuvattu kuvassa 3-11 ja tuotetun synteesikaasun koostumus taulukossa 3.5. [19]

**Taulukko 3.5.** GoBiGas-hankkeen prosessilla tuotetun synteesikaasun koostumus öljypesurin jälkeen. Muokattu lähteestä [19].

Aine	$H_2$	$CO$	$CO_2$	$CH_4$	$N_2$	Kevyet tervat	$C_nH_m$
<i>mol-%</i>	24,6	36,3	15,2	13,6	3,6	1,1	5,6



**Kuva 3-11.** GoBiGas-prosessin suunniteltu prosessikaavio. Kuva muokattu lähteestä [19]

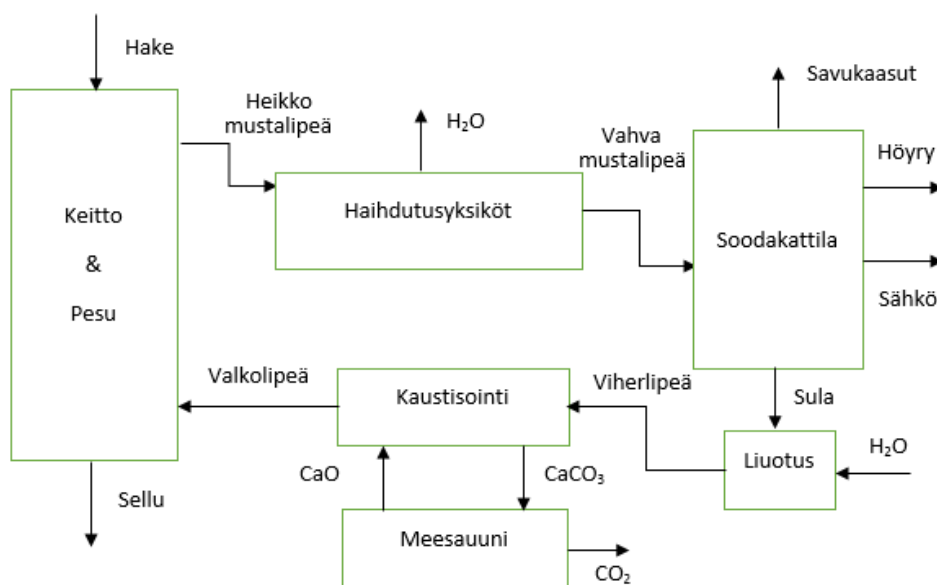
### 3.3 Tuotannon liittäminen muihin teollisiin prosesseihin

Biomassan kaasutus vaatii kaupallisen toteutettavuuden kannalta vakaat tuotemarkkinat, edullisen biomassan, korkean energiatehokkuuden sekä mahdollisesti valtiollista tukea. Teknologia kuitenkin tarjoaa tehokkaan työkalun kohti hiilineutraalia Suomea. Yksi vaihtoehto pienentää tuotannosta aiheutuvia kuluja on yhdistää kaasutusprosessi osaksi jotain muuta prosessia, jolloin prosessiin liittyviä kuluja saadaan yhdisteltyä sekä tuotua taloudellista varmuutta toimintaan. Suurin potentiaalinen biometaanituotanto liittyykin Suomessa sellutehtaissa muodostuvan mustalipeän kaasutukseen. Myös puubiomassan saatavuus tulee olla riittävällä tasolla, jottei sen kysyntä nosta hintaa liian korkeaksi käyttäjille. Laitoksen sijainnilla on myös merkitystä niin biomassan saatavuuden kuin biometaanin jatkokäsittelyn kannalta.

#### 3.3.1 Sellun valmistus

Sellun valmistus on yksi Suomen suurimmista yksittäisistä teollisuuden aloista. Metsä Fibren ja Finnpulpin viimevuotiset investoinnit kemialliseen metsäteollisuuteen ovat olleet merkittäviä. Sellun valmistus on perinteisesti perustunut soodakattilan toimintaan, jossa sellun keittokemikaalit kierrätetään ja prosessissa muodostuva mustalipeä poltetaan. Sellun keittoon liittyvä kemikaalikierto on kuvattu kuvassa 3-12. Kaasutusteknologia on kuitenkin osoittautunut potentiaalisesti seuraavaksi kehitysaskeleeksi parantaen prosessin energiatehokkuutta, sellun tuotantopotentiaalia sekä tarjoten uuden tuotesegmentin biopolttoaineiden syntetisoinnin myötä. [39,40]



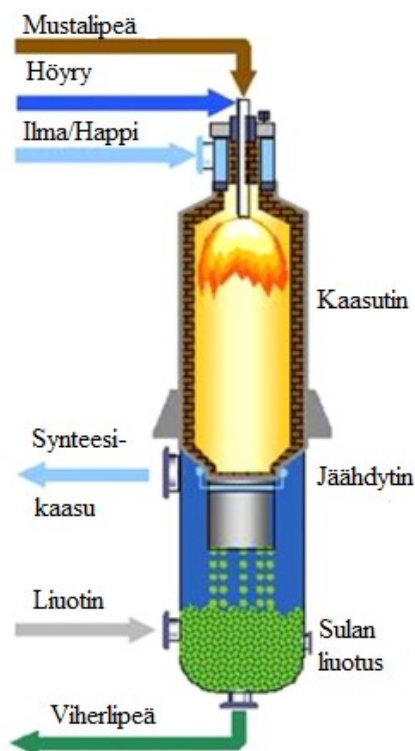


**Kuva 3-12.** Sellun keittoon liittyvä kemikaalikierto ja pääkomponentit. [39].

Sellun keitossa soodakattilalla on tärkeä merkitys niin kemikaalien talteenotossa ja kiertäyksessä kuin prosessienergian tuotannossa. Soodakattilat ylimitoitetaan yleensä niin, että energiaa tuotetaan enemmän kuin prosessi tarvitsee, ja ylijäämä myydään höyryturbiinilla tuotettuna sähkönä verkkoon. Kaasutusteknologia tarjoaa vaihtoehdon sähkön myynnille sekä parantaa laitoksen hyötysuhdetta käyttämällä kaasuturbiini-jätelämpökattilayhdistelmää yksinkertaisen höyrypiirin sijaan, mikäli tuotekaasu halutaan polttaa.

Mustalipeän kaasutusteknologiat jaetaan kahteen eri kategoriaan: matalan sekä korkean lämpötilan kaasutukseen. Matalan lämpötilan kaasutus tapahtuu 600-850 °C lämpötilassa, epäorgaanisen tuhkan sulamispisteen alapuolella. Kaasuttimet ovat yleensä leijukerroskaasuttimia. Leijukerroskaasuttimien etuna on myös mahdollisuus liittää kaustisointi suoraan kaasuttimessa tapahtuvaksi, jolloin erillistä meesauunia ei tarvita. Kaasuttimien matala lämpötila johtaa kuitenkin pieneen hiilikonversioon ja korkeaan tervapitoisuuteen, joka heikentää kaasuttimen energiatehokkuutta, mutta on silti tehokkaampi kuin perinteinen soodakattila. [39]

Korkean lämpötilan mustalipeän kaasutus tapahtuu paineistettuna yli 30 barin paineeseen 950-1000 °C lämpötilassa suspensiokaasuttimessa. Tekniikan on kehittänyt Ruotsalainen Chemrec. Korkea kaasutuslämpötila johtaa tehokkaaseen hiilikonversioon, pieneen tervanmuodostukseen sekä nestemäiseen sulaan. Synteesikaasu ja sula valuvat alaspäin samansuuntaisesti jäähdyttimeen, jossa synteesikaasu ja sula erottuvat. Sula liukenee jäähdyttimeessä muodostaen viherlipeää, joka jäähdytetään ja johdetaan liuotukseen. Kaasuttimen lämpöpinnat ovat vuorattu alumiinioksidilla, joka mahdollistaa teknologian, ja se kestää yli vuoden prosessikäytön. Kuva 3-13 kuvaa kaasuttimen rakennetta ja taulukko 3.6 sillä tuotetun synteesikaasun koostumusta. [21,39]

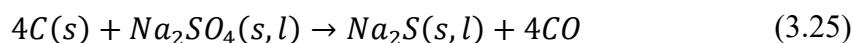
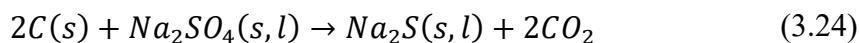


**Kuva 3-13.** Mustalipeän Chemrec-suspensiokaasutin. [39]

**Taulukko 3.6.** Mustalipeän Chemrec-kaasutuksessa tuotetun kuivan synteesikaasun koostumus, kun  $P = 30\text{bar}$ ,  $T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [39]

Komponentti	CO	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>
Osuus (%)	38,1	19,15	39,19	1,91	1,35	0,3

Mustalipeän kaasutuksessa tapahtuu yleisten kaasutusreaktioiden lisäksi seuraavat sel-lun keiton kannalta merkittävät epäorgaanisten komponenttien reaktiot:

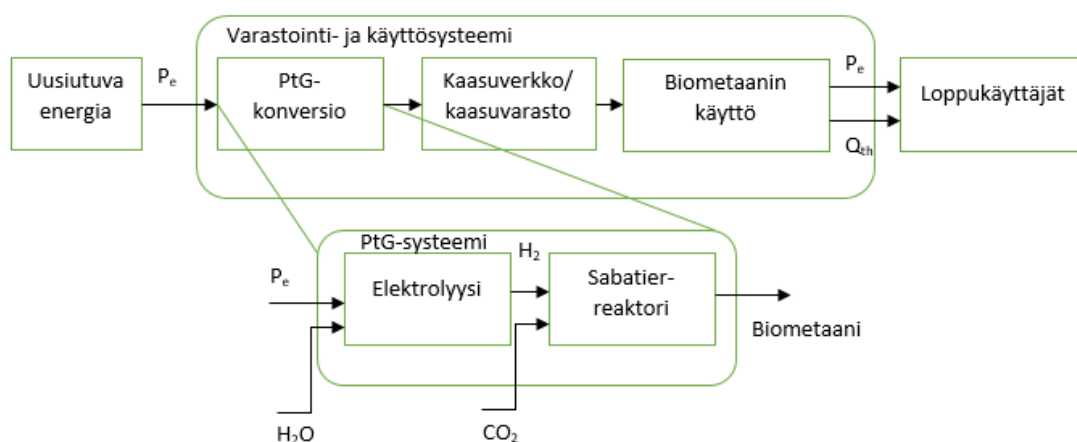


Mustalipeän kaasutusta on tutkittu paljon ja sillä on jo kaupallisen kokoluokan sovelluk-sia rinnan asennettuna perinteisen soodakattilan kanssa sellutehtaan kemikaalikierrrossa. Biopolttoaineiden tarvitsema puhdas synteesikaasu asettaa kuitenkin vielä rajoitteita prosessin käytölle. Ennen kaikkea mustalipeän partikkeleiden reaktiokinetiikka ja vir-tauslaskenta tarvitsevat vielä lisätutkimuksia, jotta prosessi voidaan suunnitella hyvin kaasuttimen jälkeen. Myös kaustisoinnin liittäminen kaasuttimeen ja kestävämpien läm-pöpintamateriaalien hyödyntäminen ovat oleellisia tutkimuksen kohteita. [21,39]

## 4. BIOMETAANIN TUOTANTO MUISTA LÄHTEISTÄ

Kaasutus- sekä metaanisynteesiteknologia mahdollistavat biometaanin tuotannon monesta eri raaka-aineesta tai energianlähteestä. Euroopassa on tutkittu ja myös otettu käyttöön monia eri näkökulmia biometaanin tuotantoon hyödyntäen uusiutuvia tai hiilineutraaleita energialähteitä. Koska sähkö on markkinalähtöinen hyödyke, joissain tilanteissa sen hyödyntäminen muuten kuin verkkoon myytäväksi voi olla kannattavaa.

Uusiutuvista energiamuodoista tuuli- ja aurinkosähkön tuotannon eriaikaisuus vuositasolla tapahtuvien kulutuspiikkien suhteen on ongelmallista sähköverkon hallinnan kannalta. Vetyteknologiaan perustuva konversio biometaaniksi on erittäin tutkittu menetelmä tasaamaan sähkön tuotantoa ja kulutusta. Mikäli tuotettu vety voidaan jatkokäsittelyllä muuntaa biometaaniksi tehokkaasti, sillä olisi paremmat käyttökohdevalikoimat sekä helpompi käytettävyys. Tuotetun vedyn voi myös hyödyntää muissa biometaaniprosesseissa, kuten biokaasulaitoksen tuottaman biokaasun jalostukseen. Uusiutuvan sähköenergian hyödyntämiseen perustuvan PtG-sovelluksen periaatekuva on esitetty kuvassa 4-1.



**Kuva 4-1.** *Power-to-Gas energian konversio- ja varastointijärjestelmän periaatekuva uusiutuvalla sähköenergialle. Kuva muokattu lähteestä [2].*

Tässä työssä PtG-systeemin tarkastelu rajataan pääosin tuulisähkön konversioon. Myös muut uusiutuvan energian lähteet soveltuvat biometaanin tuotantoon, mutta tuulivoimalla on siihen Suomessa parhaimmat edellytykset. Tuotettua vetyä voidaan hyödyntää myös muissa biometaanin tuotantoprosesseissa.

## 4.1 Tuulibiometaani ja energian varastointi

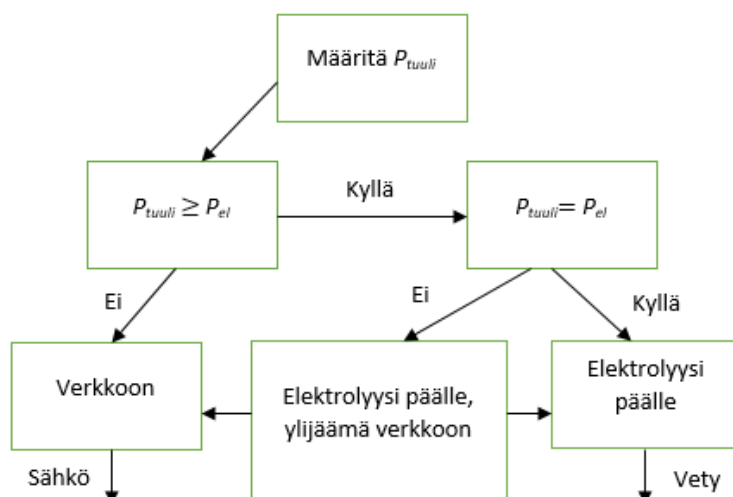
Suomessa asennettu tuulivoimakapasiteetti on kasvanut voimakkaasti 2010-luvulla. Vuoden 2016 lopussa Suomessa oli 552 tuulivoimalaa, joiden yhteenlaskettu nimellisteho oli 1553 MW ja vuosituotanto 3,1 TWh. [50]

Tuulivoiman tuotannon kannalta merkittävimmät suureet ovat tuulen nopeus tuotantopaikalla tuuliturbiinin asennuskorkeus huomioiden, maapinnan karheus ja tyyppi sekä lämpötila, joka vaikuttaa ilman tiheyteen. Tuulivoimalan tuottama teho voidaan laskea kaavan

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 C_p, \quad (4.1)$$

jossa  $\rho$  on ilman tiheys,  $A$  lapojen muodostama pinta-ala,  $V_1$  nopeus ennen tuuliturbiinia sekä  $C_p$  roottorin tehon hyötysuhde. Teoreettinen maksimi hyötysuhteelle on  $C_p = 0,593$ , joka toteutuu, kun tuulen nopeus turbiinin jälkeen  $V_2 = \frac{1}{3} V_1$ . Tuulen nopeuden vuosittaisesta jakaumasta johtuen tuulivoimalle määritetään myös niin sanottu kapasiteettikerroin, joka kertoo vuositason sen, että suuren ajan tuulivoimala toimii nimellistehollaan. Suomessa keskimääräinen tuulennopeus Etelä-Suomen rannikoilla on noin 5-8 m/s, sisämaassa noin 3-4 m/s [49]. Kapasiteettikerroin on noin 27%.

Vedyn tuotantoa elektrolyysilaitteiston avulla tuulivoimaloissa on tutkittu kirjallisuudessa [16]. Tuotanto perustuu elektrolyysilaitteiston liittämiseen tuulivoimalan yhteyteen ja sen mitoittamiseen siten, että tuotanto olisi mahdollista ilman merkittävää haittaa tuulisähkön tuotolle. Koska elektrolyysipiirit vaativat vakiotehon vedyn tuotantoa varten, tuotettu sähkö täytyy joko varastoida akustoihin tai elektrolyysin teho täytyy mitoittaa tarpeeksi pieneksi. Kuvassa 4-1 kuvataan tuulivoimalla tuotetun vedyn yksinkertaistettua lohkokaaaviota. Tuotanto voidaan mitoittaa myös siten, että haluttu tuulisähkön teho pidetään vakiona, mutta tämä vaatisi monesta eri moduulista rakennettavaa elektrolyysipiiriä eikä tuotanto pysyisi yhtä tasaisena. Kuvan 4-2 kaavion tuotantomalli kuvaa tilannetta, jossa vety on tuulivoimalan primäärituote, ja verkkoon myytävä sähköenergia pienentää vedyn tuotantokustannusta.



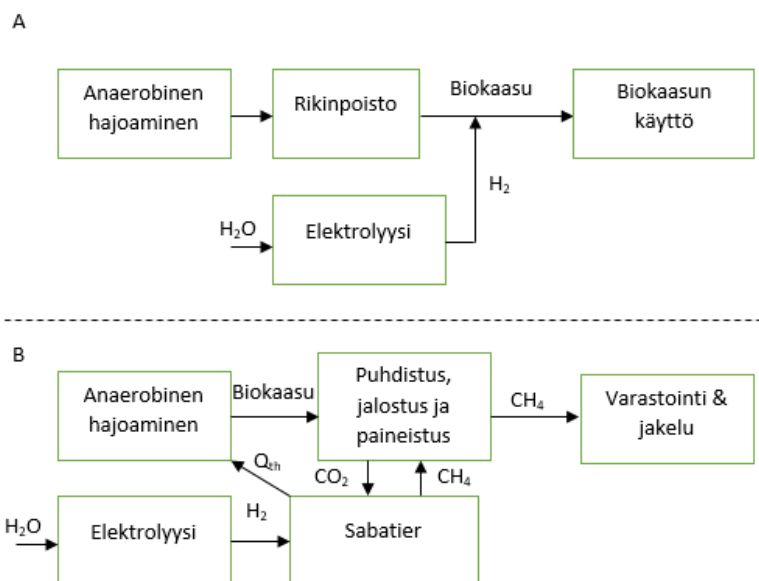
**Kuva 4-2.** Vuokaavio tuulisähkö-elektrolyysipiirille. Kuva muokattu lähteestä [16].

Biometaanin tuotanto vedystä Sabatier-reaktorissa vaatii vielä lisäksi jonkin hiilidioksidin lähteen. Puhdasta hiilidioksidia on saatavilla esimerkiksi biokaasulaitoksesta, jossa on PSA-jalostusjärjestelmä. Tuotanto kannattaakin liittää johonkin toiseen prosessiin, jotta investointikustannuksia saadaan jaettua sekä prosessit toimisivat toisiaan täydentävästi.

Maakaasuverkon hyödyntäminen energian varastoinnissa tarjoaa merkittävän kapasiteetin. Vedyn turvallisen ja käytännöllisen varastoinnin ongelmien vuoksi sen jatkokäsittely metaaniksi tarjoaa hyvän vaihtoehdon sähkön ylituotannon varastointiin. Koska uusiutuva energiatuotanto ei ole säädeltävissä sähköverkon tarpeiden mukaiseksi, varastointijärjestelmien käyttöönotto vähentäisi fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Energian varastoitavuuden merkitys voimistuu etenkin Suomessa, koska talvisin suuret kulutuspiikit johtavat yleensä lisääntyneeseen öljyn ja kivihiilen käyttöön. PtG-järjestelmässä tuotettu biometaani voidaan käyttää myös kemianteollisuudessa.

## 4.2 Elektrolyysin hyödyntäminen bio- ja synteetikaasun jalostuksessa

Elektrolyysin avulla tuotettu vety voidaan hyödyntää bio- ja synteetikaasun tuotannon yhteydessä suoraan. Kaasutukseen perustuvan synteetikaasun jatkojalostus biometaaniksi tarvitsee shift-reaktorin, jossa synteetikaasun H<sub>2</sub>-pitoisuutta nostetaan. Mikäli edullista sähköä on saatavilla, synteetikaasun vetypitoisuutta voidaan nostaa myös suoraan, pienentämättä kaasun muiden komponenttien määrää, joka johtaa korkeampaan biometaanituottoon. Elektrolyysissä syntyvä happi voidaan myös hyödyntää tietyissä kaasutuslaitoksissa. Biokaasun tapauksessa vedyn avulla biokaasun metaanipitoisuutta tai tuotantomäärää voidaan nostaa. Elektrolyysipiirin yhdistäminen biokaasun tuotantoon on esitetty kaavioissa 4-3.



**Kuva 4-3.** Elektrolyysin hyödyntäminen (A) biokaasun tuotannossa (B) biometaanin tuotannossa. Kuva muokattu lähteestä [9].

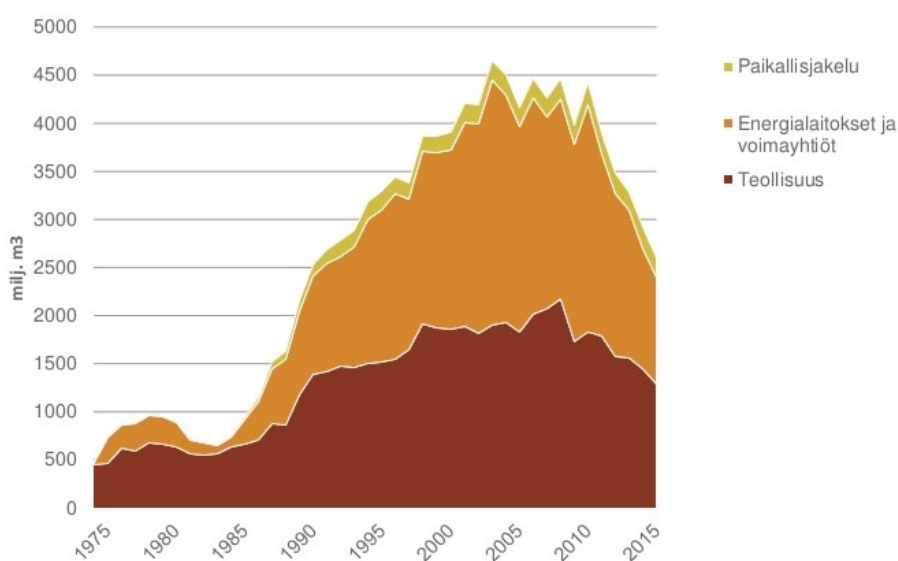
Biokaasun suora metanointi, kaavio A, johtaa tuotetun biokaasun lämpöarvon nousuun. Koska Sabatier-reaktio on eksotermiäinen, biokaasu lämpenee. Menetelmä sopii esimerkiksi korkeamman lämmöntarpeen hetkelliseen kattamiseen, kun biokaasun metaanipitoisuus tai tuotantomäärä ei ole tarpeeksi korkealla.

Sabatier-reaktorin yhdistäminen biometaanin tuotantolaitoksen yhteyteen, kaavio B, mahdollistaa biometaanin tuotannossa eritellyn hiilidioksidin hyötykäytön. Eksotermisestä metanointireaktiosta saatava lämpö voidaan myös hyödyntää biokaasureaktorissa, joka vähentää prosessienergian tarvetta. Sabatier-reaktorista saatava synteesikaasu on noin 80-90 % metaania, joten siinä tuotettu kaasu täytyy vielä jalostaa riittävään metaanipitoisuuteen.

Tutkimuksessa [9] on havaittu, että elektrolyysipiirin yhdistys biokaasun tuotantoon nostaa vuosittaisia tuotantokustannuksia noin 40-60%, mutta tuotetun biometaanin tuotantohinta pysyy kutakuinkin vakiona, kun elektrolyysipiirin käyttämän sähkön hinta pysyy välillä 30-40 €/MWh tai alle. Menetelmä siis nostaa biometaanin tuotantolaitoksessa tuotetun biometaanin määrää ilman muutoksia anaerobiseen hajoamisprosessiin. Oleellista tuotetun biometaanin ympäristöjalanjäljen kannalta on, että mistä elektrolyysipiirin tarvitsema sähkö tulee.

## 5. BIOMETAANIN KÄYTTÖ JA VARASTOINTI

Biometaanilla ja maakaasulla on käytännössä samat käyttökohteet. Suurin ero on, että biometaanilla voidaan tuottaa itse uusiutuvista lähteistä, sitä voidaan hyödyntää energian varastointivälineenä sekä käyttää paikallisesti. Kaasuverkkoon syötettynä kaasut kuitenkin sekoittuvat, ja niillä on yhteiset käyttömarkkinat, kuten sähköverkkoon tuotetulla fossiilisella ja uusiutuvalla energialla. Biometaanilla voidaan myös käyttää pienemmän jalostusasteen tarvitsemissä kohteissa, kuten sähkön- ja lämmöntuotannossa, kaupallisesti järkevästi. Kuvassa 5-1 kuvataan maakaasun käyttöä Suomessa vuosina 1975-2015.



**Kuva 5-1.** Maakaasun käyttökohteet ja määrä Suomessa vuosina 1975-2015. [48]

Tässä kappaleessa tarkastellaan biometaanin eri käyttökohteita. Maakaasua käytettiin Suomessa vuonna 2016 26,1 TWh, joten raaka-aineena maakaasu ja biometaani ovat erittäin käyttökelpoisia. Kulutus jakautui teollisuuden ja energiantuotannon välillä kutakuinkin tasan. Maakaasu on myös käytännössä puhtaimmin palava fossiilinen polttoaine, jonka käytölle olisi perusteita ja halua, mutta sen nouseva hinta laskee sen houkuttelevuutta. Kysyntä vaihtoehtoiselle biometaanille kasvaa aina fossiilisen maakaasun hinnan noustessa. Suomessa biometaanin kokonaistuotantopotentiaali on noin 15-16 TWh pelto- ja puubiomassojen sekä puubiomassojen täydellä hyödyntämisellä, noin 22 TWh mikäli mustalipeä onnistutaan myös lisäämään tuotannon raaka-aineeksi.

Biometaani sopii hyvin voimalaitoksen polttoaineeksi. Kaasuturbiini-kombivoimalaitos on sähköntuotannon hyötysuhteen ja volyymin kannalta yksi maailman parhaimmista teknisistä ratkaisuista. Biometaanilla ja biokaasulla voidaan myös hyödyntää paikalliseen, hajautettuun energiantuotantoon pienessä mittakaavassa esimerkiksi maatiloilla korvaamaan öljyä. Puupolttoaineiden ja biometaanin tuotannon yhdistelmällä voidaan päästä

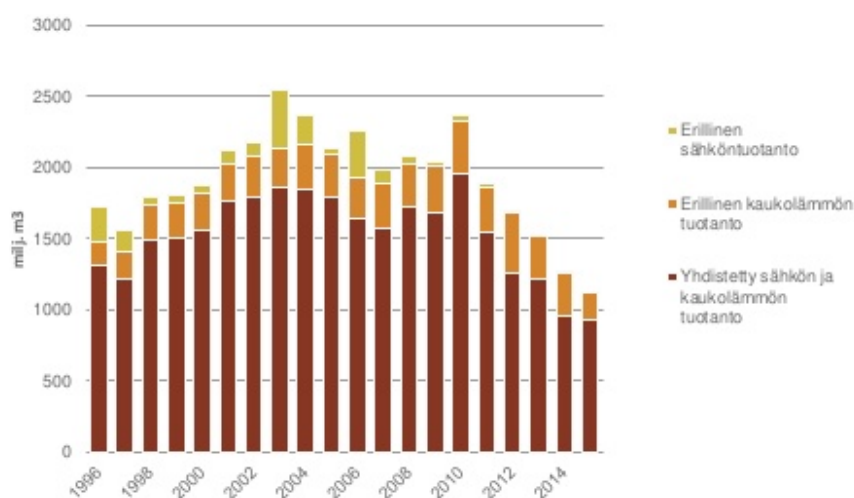
korkeisiin rahallisiin säästöihin sekä pienentää oman maatalan hiilijalanjälkeä merkittävästi.

Maakaasua on myös jaettu paikallisesti noin 1,5-2 TWh vuosittain kaasuverkoston alueella. Käyttökohteet ovat olleet pienkäyttöä esimerkiksi kotitalouksissa, palveluyrityksissä sekä liikennepolttoaineena. Liikennepolttoaineena maakaasua käytettiin vuonna 2016 52,2 GWh, joka vastaa noin 5000 henkilöauton vuosittaista energiantarvetta. [48]

Liikennepolttoaineet koostuvat tällä hetkellä käytännössä kokonaan öljypohjaisista polttoaineista. Sähkön- ja lämmöntuotanto voidaan korvata helpommin uusiutuvalla energialla taistelussa hiilidioksidipäästöjä ja ilmaston lämpenemistä vastaan, mutta liikennesektorin päästöt ovat edelleen merkittävä ongelma. Käytännössä hiilineutraaliustavoitteisiin pääseminen vaatii näiden polttoaineiden korvausta ympäristöystävällisemmillä vaihtoehdoilla. Biometaanin etuna liikennepolttoainemarkkinoilla ovat tuotantomenetelmien monimuotoisuus eri suuruusluokissa, kotimaisuus, soveltuvuus nykyisen autokannan ja infrastruktuurin kanssa sekä kilpailukykyinen hinta bensiiniin verrattuna. Etuna muihin uusiutuviin energialähteisiin ja tuotantomenetelmiin verrattuna biomassan konversiolla saavutetaan myös energian varastoitavuus. Haasteita kaasuautoilun yleistymiselle ovat autokannan ja jakeluinfrastruktuurin kehittäminen, epävarma tulevaisuus verotuksen ja tuotantotukien suhteen sekä suuren mittakaavan tuotantomenetelmien kaupallinen epäkypsyys.

## 5.1 Voimalaitosympäristö

Suomessa maakaasua käytetään voimalaitospolttoaineena Etelä-Suomessa CHP-voimalaitoksissa. Viimeisen kymmenen vuoden aikana maakaasun käyttö energiantuotantoon on kuitenkin laskenut merkittävästi johtuen sen hinnan noususta, sähkön hinnan laskusta sekä lisääntyneestä kiinnostuksesta uusiutuvaan energiaan. Kuvassa 5-2 kuvataan maakaasun käyttöä energian tuotannossa Suomessa vuosina 1996-2016.

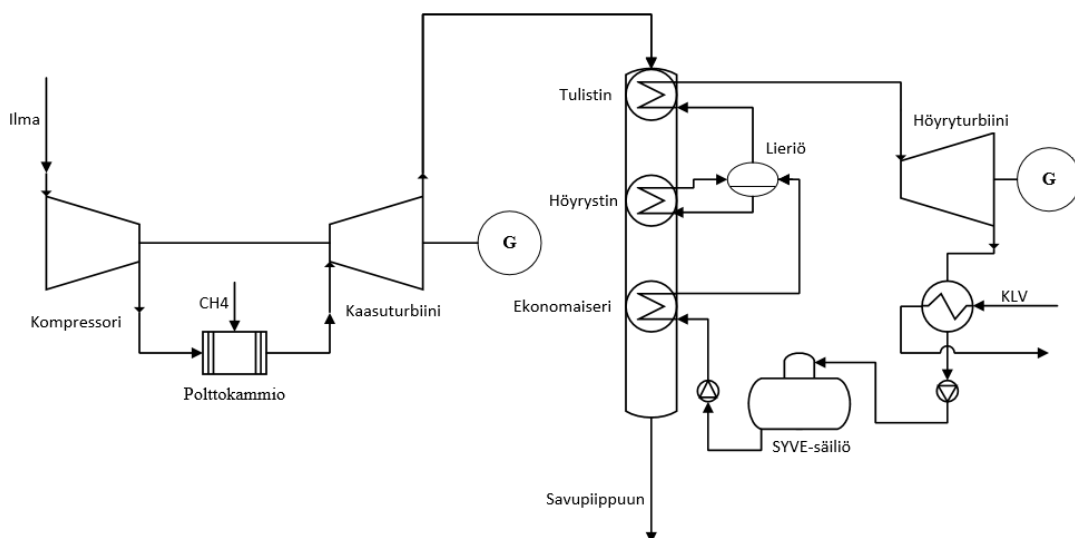


**Kuva 5-2.** Maakaasun käyttö sähkön- ja lämmöntuotannossa vuosina 2016. [48]



### 5.1.1 Kombivoimalaitos

Kombivoimalaitos koostuu yleisesti kaasuturbiini- sekä höyryvoimaprocessista. Tällaisessa kytkennässä höyryvoimaprosessi kytketään yhteen niin sanotun topping-prosessin kanssa, joka perustuu korkeammassa lämpötilassa toimivan prosessin hukkalämmön hyödyntämiseen. Yleisiä topping-prosesseja ovat juuri kaasuturbiiniprosessi sekä esimerkiksi polttomoottori. Kuvassa 5-3 kuvataan maakaasukäyttöisen kombivoimalaitosprosessin perusrakennetta. [44]



**Kuva 5-3.** Yksinkertaistettu kombivoimalaitoksen prosessikaavio ilman reduktioita.  
[44]

Kaasuturbiiniprosessin toiminta perustuu samalla mekaanisella akselilla olevien kompressorin sekä turbiinin toimintaan. Polttokammioon tuleva polttoilma paineistetaan kompressorin avulla yleensä noin 10 baarin paineeseen. Polttokammioista lähtevät kuumat, paineistetut savukaasut virtaavat kaasuturbiinin läpi, jolloin niiden sisältämä energia muuttuu mekaaniseksi työksi, jonka avulla generaattori tuottaa sähköä. Kaasuturbiinin toiminnan kannalta on tärkeää, että käytetty polttoaine palaa erittäin puhtaasti eikä muodosta pienhiukkaspäästöjä. Maakaasu sekä puhdistettu biometaanin ja synteesikaasu soveltuvat kaasuturbiiniprosessin polttoaineeksi. [44]

Kombivoimalaitoksen sähköntuotannon hyötysuhde saadaan CHP-käytössä yli 50% tasolle. Tarkka arvo riippuu kaasuturbiinille menevän savukaasun sisäänmenolämpötilasta, höyryprosessin painetasojen määrästä sekä jätelämpökattilan suunnittelusta. Rajoittavia tekijöitä hyötysuhteelle ovat polttokammion seinämien sekä kaasuturbiinin siipien kuumakestävyys. Suomessa kombivoimalaitokset ovat yleensä CHP-käytössä, jolloin sähköntuotantoa ei maksimoida sekä voimalaitoksen kokonaishyötysuhde pysyy parempana. Käytettäessä kaksi- tai kolmipainekytkentää höyryn välitulistusten avulla sähköntuotannon hyötysuhde saataisiin jopa 57-60% tasolle, mutta laitoksen investointikustannukset

nousisivat. Liitteessä 7 on esitetty Tampereen Lielahdessa olevan kombivoimalaitoksen  $\Phi P$ -karakteristika, joka kuvaa laitoksen sähkön- ja lämmöntuotantoa sekä niihin liittyviä säätömahdollisuuksia. [44]

Metaanipolttoaineita käyttävät kombivoimalaitokset eivät tuota lainkaan  $SO_x$ -päästöjä sekä  $NO_x$ -päästöt voidaan säätää päästönormien alapuolelle tehokkaasti. Maakaasua käytettäessä  $CO_2$ -päästöt ovat myös noin 50% pienemmät tuotettua sähkön energiayksikköä kohti verrattuna lauhdehiilivoimalaan. Kaasuturbiiniprosessien typpipäästöt muodostuvat pääosin termisesti, johon vaikuttavat polttolämpötila sekä reaktiokinetiikka. Savukaasujen lämpötilaa alentamalla  $NO_x$ -päästöjä saadaan laskettua helpoiten, joka toteutetaan yleensä vesi- tai höyryinjektiolla polttokammioon tai käyttämällä kompressorilta saatavaa ilmaa. [44]

Kaasuturbiinit sopivat hyvin nykyisiin voimalaitosprosesseihin johtuen niiden edullisista investointikustannuksista sekä hyvistä hyötysuhteista. Kaasuturbiiniprosessien käynnistysaika on noin 2 minuuttia, joka tekee niistä soveltuvia sähköntuotannon säätövoimaksi. Biometaanin kannalta tämä on merkittävää, koska uusiutuvien energiamuotojen heikkoutena on juuri tuotannon ajallinen hallinta sekä varastoitavuus. Kaasuturbiini-kombivoimalaitos voitaisiin toteuttaa myös synteetikaasua käyttävänä IGCC-voimalaitoksena, jolloin sen polttoaineena voitaisiin käyttää biomassaa, mutta sen investointikustannukset ovat huomattavasti kalliimmat eikä sitä voi varastoida.

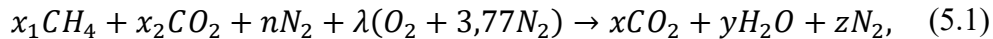
### 5.1.2 Lämpökattila

Biokaasun käyttö lämmitykseen on yksinkertainen hyödyntämistapa, johon kaasun jalostusasteen ei tarvitse olla korkea. Biokaasu poltetaan lämpökattiloissa, joissa palamisessa syntyvä lämpö sitoutetaan väliaineeseen, yleensä veteen. Lämmitysvesi kiertää yleensä vetenä kattilan ja lämmityskohteen välillä. Lämmityskäytössä käytön kokonaishyötysuhde saadaan korkeaksi, jopa 95% tasolle [28].

Poltto lämpökattilassa ei välttämättä tarvitse kaasun puhdistusta. Tietyt kaasupolttimet kestävät heikkolaatuisessa biokaasussa olevaa rikkiä, jolloin erillistä rikinpoistoa ei välttämättä tarvita. Laitteiston kestävyys kannalta vesihöyryn ja rikin määrän vähennys ovat kuitenkin oleellisia. Biokaasua voidaan myös käyttää muihin sovelluksiin, kuten keittiökäyttöön tai pieniin lämmittämiin. [28]

Suomessa biokaasun käyttö keskittyy lämmön tuotantoon. Biokaasu on kilpailukykyinen lämmöntuotannon polttoaine, jos sen tuotannolle on hyvät paikalliset edellytykset. Etenkin lämmitysöljyn vaihtaminen biokaasuun onnistuu hyvin, koska yleensä kattilassa oleva poltin voidaan vaihtaa kaksipolttoainepolttimeksi, jolloin öljyä voidaan myös käyttää tarvittaessa [33]. Biokaasun tulee kuitenkin olla käytännössä ilmaista tai hyvin edullista tuotannon investointikustannukset huomioiden, koska Suomessa puupohjaiset polttoaineet ovat edullisia lämmön tuotantoon.

Tarkasteltaessa  $1 \text{ kmol}$  biokaasun  $x_1CH_4 + x_2CO_2 + nN_2$  palamista, palamiselle saadaan reaktioyhtälöksi [7]



jossa  $x_1$ ,  $x_2$  ja  $n$  ovat biokaasun komponenttien mooliosuudet,  $\lambda$  ilmakerroin sekä  $x$ ,  $y$  ja  $z$  savukaasujen komponenttien osuudet. Reaktioyhtälön kertoimista huomataan, että biokaasun palaminen tarvitsee selkeästi vähemmän kuivaa ilmaa kuin jalostetun biometaanin. Biokaasulle yleisesti  $x_1 = 0,5..0,65$  ja  $x_2 = 0,35..0,5$ . Kun  $x_2 \leq 0,02$ , eli maakaasun tai jalostetun biometaanin tapauksessa, polttoon tarvittava kuivan ilman määrä nousee lähes kolminkertaiseksi verrattuna tavanomaisen biokaasun polttoon [7]. Biokaasun metaanipitoisuuden seuraaminen onkin oleellista lämpökattilan polttimeen optimoinnin kannalta, jotta kaasu palaa parhaalla mahdollisella liekillä tuottaen mahdollisimman kuumaa savukaasua [33]. Savukaasujen lämpötilan tulee myös pysyä kastepisteen yläpuolella [56].

## 5.2 Liikennekäyttö ja kaasuautoilun markkinatilanne Suomessa

Biometaani soveltuu käytettäväksi henkilöautojen moottoreissa. Ottomoottorissa biometaanin ja maakaasu palavat sellaisenaan, dieselmootorissa kaasut ei syty pelkän puristuksen vaikutuksesta vaan sytytykseen tarvitaan pieni määrä dieseliä. Maakaasun ja biometaanin liikennekäyttö on Suomessa ollut vähäistä johtuen autokannan ja kaasun jakeluasemien määrästä.

Kaasuautojen ovat yleensä kaksoispolttoaineversioita, joissa voi käyttää sekä bensiiniä ja kaasua. Autoon täytyy asentaa erillinen polttoainejärjestelmä kaasusäiliöineen, jonka avulla käyttäjä voi itse päättää käytettävän polttoaineen. Järjestelmän etuna on myös autolla päästävän kantaman huomattava kasvu, mikäli perinteinen bensiinihenkilöauto muutetaan kaasuautoksi. Metaanin ominaisuuksia ei kuitenkaan päästä hyödyntämään näissä bi-fuel –autoissa täydellisesti johtuen bensiinin ja maa- ja biokaasun kemiallisten ominaisuuksien eroista, joka johtaa kaasun ei-täydelliseen palamiseen moottorissa sekä heikentyneeseen hyötysuhteeseen. Taulukossa 5.1 on kuvattu biometaanin, bensiinin ja nesteytetyn maakaasun LNG:n moottoripolttoainekäyttöön liittyviä tunnuslukuja. [30]

Fossiiliset, nestemäiset polttoaineet ovat erittäin vakiintuneessa asemassa liikennepolttoaineina. Trafin tilastojen [53] mukaan maakaasua tai biometaanin käyttäviä autoja Suomessa vuoden 2016 lopussa oli 2175 kappaletta, sisältäen kaksipolttoaineautot, kasvun ollessa 19% verrattuna vuoteen 2015. Samaan aikaan bensiinikäyttöisten autojen määrä laski ja dieselautojen sekä hybridi- ja sähköautojen määrä kasvoi.

**Taulukko 5.1** Bensiinin ja kaasujen moottoripolttoainekäyttöön liittyvät ominaisuudet ja tunnusluvut. [11]

<i>Ominaisuus</i>	<i>Bensiini</i>	<i>CBG/CNG (200bar)</i>	<i>LBG/LNG (-162 °C)</i>
<i>Tehollinen lämpö-arvo [MJ/kg]</i>	43,5	49,9	49,9
<i>Puristussuhde</i>	6:1 – 12:1	13:1 – 15:1	13:1 – 15:1
<i>Tiheys [<math>\frac{kg}{m^3}</math>]</i>	730	160	411
<i>Oktaaniluku</i>	95-98	133	133
<i>Stoikiometrinen palamissuhde</i>	14,7:1	17,4:1	17,4:1

Biometaanilla on liikennepolttoaineena monia etuja verrattuna nestemäisiin polttoaineisiin. Yksihiilinen, homogeeninen rakenne johtaa alhaisiin päästöihin sekä eri päästökomponenttien pieneen määrään sekä erittäin pieniin hiukkaspäästöihin. Biometaanin poltossa muodostuvalla hiilidioksidilla ei ole nettovaikutusta. Poltossa muodostuvien typen oksidien poisto voidaan toteuttaa tehokkaammin auton katalysaattorissa verrattuna nestemäisistä polttoaineista muodostuvaan savukaasuun. Nestemäisiä päästöjä ei muodostu ollenkaan. Lisäksi metaanin ominaisuudet mahdollistavat polttomoottorin korkeamman hyötysuhteen, paremmat kylmäkäyttöominaisuudet sekä soveltuvuuden monipuoliseen moottorivalikoimaan. Biometaanin oktaaniluku voi olla korkeampi kuin maakaasun, johtuen kaasussa olevan hiilidioksidin vaikutuksesta. Moottoriteknisesti tämä voitaisiin hyödyntää puristussuhteen nostona. [28]

Lappeenrannan teknillisen yliopiston tekemässä tutkimuksessa [55] selvitettiin biometaanin liikennekäyttöön vaikuttavia tekijöitä. Tutkimuksen mukaan biometaanin tuotanto ei ole rajoittava tekijä kaasuautoilun edistämiseksi, mutta maakaasuverkon rajoituksessa Etelä-Suomeen biometaanin ja maakaasun jakelu ei ole riittävällä tasolla kilpailemaan nestemäisten polttoaineiden kanssa muualla Suomessa. Kaasuautojen tankkausasemien määrä kasvaa jatkuvasti, mutta ei ole vielä samalla käytännöllisyyden tasolla kuin nestemäisten polttoaineiden. Biometaanin tuotantolaitoksien tarvitseman biomassan saanti edulliseen hintaan voi myös olla käytännössä rajoitteena tuotannon kasvulle täyten potentiaaliinsa. Taloudellisesti käyttäjän kannalta biometaanin ja liikennebensiinin välillä ei ole merkittävää eroa johtuen käyttövoimaverotuksesta, vaikka biometaanin käyttö on huomattavasti ympäristöystävällisempää. Verohelpotukset biometaanin käyttäjille sekä tuotantotuki tuottajille voisivat lisätä investointien houkuttelevuutta sekä kaasuautokannan kasvua.

Kaasuautoilun etuna verrattuna sähkö- ja hybridautoihin on vanhemman autokannan soveltuvuus. Tämä on merkittävää etenkin Suomessa, jossa käytössä oleva autokanta on vanhaa. Myös uusien kaasuautojen hinta on edullisempi kuin sähköautojen. Vaikka sähköautot ovat kaikista energiatehokkaimpia tarkasteltaessa ajoneuvon kulutusta, kaasuautoilu on kilpailukykyinen ja ympäristöystävällinen vaihtoehto fossiilisille öljypohjaisille polttoaineille. Biometaanin kotimaisuus tuottaa myös työtä sekä tuloja monelle eri tuotantoketjun toimijalle.

Biokaasun jalostus liikennebiometaaniksi on sekä taloudellisesti että ympäristöystävällisesti paras vaihtoehto biokaasun loppukäytöstä. CHP-tuotannossa biokaasu ei ole kaupallisesti kilpailukykyinen verrattuna muihin polttoaineisiin, ellei biokaasun tuotantoon tarvitsemaa syötettä saada ilmaiseksi. Sähkön hinta ja tukijärjestelmien puute Suomessa johtavat siihen, että raaka-aineen jalostus biometaaniksi tarjoaa myös monelle muulle teollisen prosessille uuden lopputuotteen, kuten puubiomassan tai mustalipeän kaasutukselle. Uusiutuvia liikennepolttoaineita ei ole yhtä paljon ja helposti saatavilla kuin uusiutuvia sähkö- tai lämpöenergian lähteitä. LBG-biometaanin soveltuu myös raskaan liikenteen polttoaineeksi.

Suomessa kulutettiin liikennebenssiiniä ja dieseliä 47,1 TWh vuonna 2016 [61]. Määrästä olisi mahdollista kattaa biometaanilla noin 46%, mikäli kaikki tuotantopotentiaali käytettäisiin hyödyksi.

### 5.3 Hajautettu sähköntuotanto

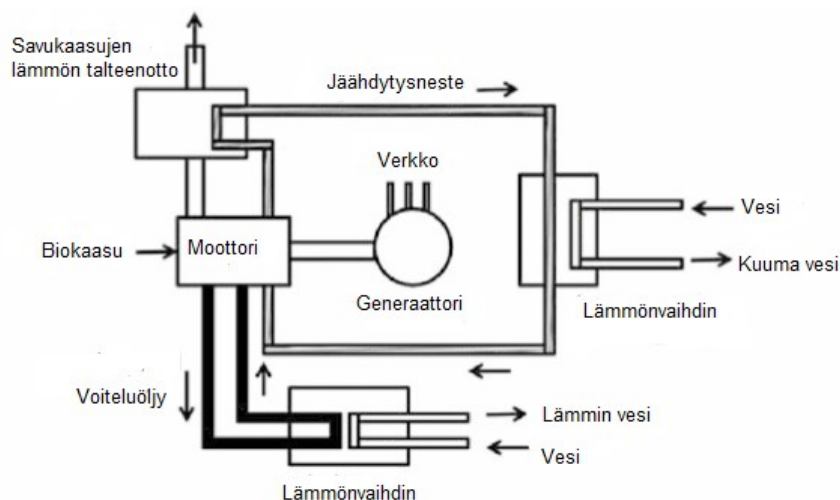
Biokaasuteknologia mahdollistaa paikallisen, pienen mittakaavan energiatuotannon. Hajautettu energiantuotanto mahdollistaa esimerkiksi maatilojen energiaomavaraisuuden tai liiketoiminnan sähkön myyjänä. Hajautetussa sähköntuotannossa pienet laitokset tuottavat sähköä sen siirtoverkkoon, joka asettaa haasteita verkon hallinnalle ja sähkön laadun valvonnalle. Hajautettua, pienimuotoista sähköntuotantoa varten biokaasua ei tarvitse jalostaa biometaaniksi.

Otto-moottorit ovat suosituimpia lämpövoimakoneita biokaasun CHP-tuotantoon maailmalla sekä Suomessa. Suomessa biokaasusähkön tuotanto aloitettiin vuonna 1936 [28]. Biokaasun metaanipitoisuuden alaraja käyttökohteissa on noin 40% [28], ja sähköntuotannon hyötysuhde vaihtelee välillä 20-45%. Biokaasun varastoitavuus mahdollistaa sähkön- ja lämmöntuotannon ajallisen määrityksen, joka on yleisesti uusiutuvien energiamuotojen heikkous.

#### 5.3.1 Polttomoottori

Polttomoottorit ovat merkittävin lämpövoimakone biokaasun CHP-tuotannossa. Euroopassa nelitahtisten CHP-moottoreiden jakauma on 50% ottomoottoreita ja 50% dieselmoottoreita [56]. Modernin CHP-laitoksen kokonaishyötysuhde on noin 85-90%, jolloin

vain 10-15% biokaasun sisältämästä kemiallisesta energiasta menetetään. Moottoreiden heikkous on kuitenkin matala sähköntuotannon hyötysuhde. Kuvassa 5-4 esitetään bio-kaasua käyttävän moottorivoimalan periaatekuva. [56]



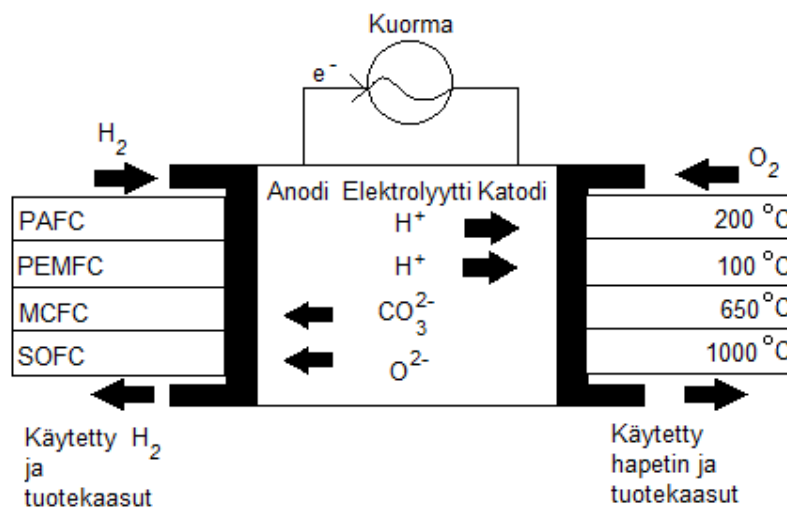
**Kuva 5-4.** Biokaasua käyttävä CHP-voimalaitos. Kuva muokattu lähteestä [56].

Suurin osa moottoreista kestää noin 110-500 ppm rikkiyhdisteiden pitoisuuden [56,28], mutta tietyt moottorit vaativat puhdistettua ja/tai jalostettua biokaasua. CHP-moottoreiden käytettävyyden kannattavuus perustuu läheiseen lämmöntarpeeseen sekä lämmön talteenottoon moottorin eri osista [56]. Kuvassa 5-4 esitetään lämmön talteenotto moottorin jäähdytysnesteestä, voiteluöljyn jäähdyttimestä sekä pakosarjasta. Tietyissä moottoreissa myös imuilman paineistavan radiaalikompressorin välijäähdytyksestä on talteen otettavaa lämpöenergiaa. Yleisesti moottorilta lähtevän kuumen veden lämpötila on 90-130 °C, ja se palaa lämmönvaihtimelle noin 70-110 °C -asteisena. [56]

### 5.3.2 Polttokenno

Polttokennot tuottavat sähköä sähkökemiallisen reaktion seurauksena, jossa happi sekä vety yhdistyvät muodostaen vettä. Kennotyypit jaetaan eri ryhmiin käytettyjen katodi- ja anodimateriaalien, elektrolyytin, polttoaineen ja käyttölämpötilan mukaan [56]. Jokainen kenno koostuu negatiivisesta anodista sekä positiivisesta katodista. Näiden välissä on kiinteä tai nestemäinen elektrolyytti. Polttoaine  $H_2$  syötetään anodille, jossa se hajoaa  $H^+$ -ioneiksi sekä elektroneiksi  $e^-$ . Samaan aikaan katodille syötetään happea, yleensä ilman mukana. Ionit välittyvät elektrolyytin läpi, joka on sähkönsiirtävyyden kannalta eriste, ja elektronit kulkevat ulkoisen sähköpiirin kautta muodostaen potentiaalieron, jännitteen. Yhden kennon välinen potentiaaliero on 0,6 – 0,9 V, ja useamman kennon sarjakytkennällä saadaan kennolle haluttu kokonaisjännite ja teho. Katalyyttien avulla reaktiota voidaan voimistaa. [34,56]

Tietyissä polttokennoissa elektrolyytti läpäisee happimolekyyliä, jolloin reaktio tapahtuu anodin puolella [56]. Kuvassa 5-5 esitetään yleisimpien polttokennojen rakenne sekä käyttölämpötilat.



**Kuva 5-5.** Polttokennotyypit, niiden käyttölämpötilat sekä ionit. Kuva muokattu lähteestä [56].

Polttokennossa käytetty biokaasu täytyy puhdistaa ennen käyttöä huomattavasti tarkemmin kuin CHP-moottorissa. Rikkiyhdisteet täytyy poistaa kaasusta käytännössä kokonaan, kuten myös siloksaanit sekä halogenoidut hiilivedyt [28,41]. Biokaasu reformoidaan vedyksi ennen syöttöä kennoon.

Biokaasulle sopivin polttokenno on kiinteäoksidinen SOFC-polttokenno. Kenno toimii korkeassa lämpötilassa, noin 700-1000 °C, jolloin se soveltuu myös CHP-tuotantoon. Kennon sähköntuotannon hyötysuhde on jopa 60%, sekä kokonaishyötysuhde 85-90% [41,56]. Kennoja voidaan asentaa kokoluokkiin 1 kW-2 MW. Kennossa voidaan käyttää monia eri katalyyttimateriaaleja ja kiinteä elektrolyytti pienentää elektrolyytin hallintaan liittyviä ongelmia. Korkeasta käyttölämpötilasta johtuen kenno ei ole yhtä kestävä kuin muut tyypit, sekä käynnistyy hitaammin. [34,56]

## 5.4 Biometaanin varastointi & jakelu

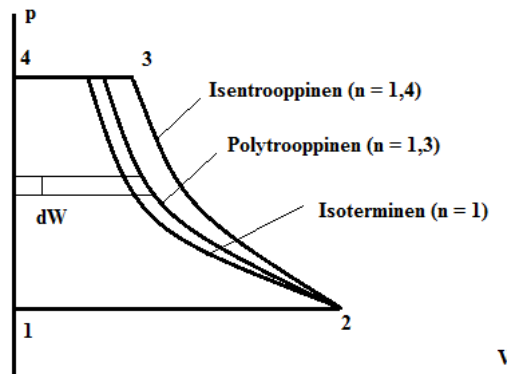
Liikennepolttoaineiden kannalta tärkeä ominaisuus on polttoaineen energiatehokas, helppo ja toimiva varastoitavuus. Biometaanin ja maakaasun varastoinnissa ja kuljetuksessa keskitytään saavuttamaan mahdollisimman suuri energiamäärän ja massan siirto mahdollisimman pienellä työllä. Metaanin ominaisuuksista johtuen käytössä olevat tekniikat ovat paineistus, nesteytys, adsorptio kiinteään aineeseen. Myös siirto kiinteärakenteisessa metaaniverkossa on mahdollinen, mutta Suomessa sen käyttö keskittyy vain maan kaakkois- ja eteläosiin. Myös biometaanin pääosin hajautettu tuotanto hankaloiittaa kaasuverkoston hyödyntämistä ja vaatisi näin ollen mittavia investointeja.

### 5.4.1 CBG

Paineistetut biometaanisäiliöt ovat yleisin ratkaisu biometaanin varastointiin. Ne perustuvat kaasun tilavuuden pienentymiseen paineistettuna, joka mahdollistaa suuremman energiatihedyn sekä suurien energiamäärien varastoinnin autoon. Haittapuolena varastointimuodossa on sen tarvitsema suuri tehontarve verrattuna nestemäisiin polttoaineisiin, joka nostaa biometaanin tuotantohintaa. Mikäli metaanille haluttaisiin sama energiatiheys kuin liikennebensiinille, sen varastointipaine tulisi olla noin 800 bar.

Tavallisesti CBG-tekniikkaa hyödyntävissä henkilöautoissa kaasusäiliöiden paine on 200 baria. Biometaanin jalostus- ja tankkausasemilla painetaso voi olla tätä korkeampi, joka mahdollistaa henkilöauton CBG-säiliön täytön ilman kompressorin käyttöä. Tietyissä ras- kaan liikenteen sovelluksissa, kuten busseissa ja kuorma-autoissa, säiliön paine on yleensä 250 bar.

Kuvassa 5-6 on esitetty ideaalikaasun häviötöntä puristusprosessia  $pV$ -tasossa. Kuvassa väli 1-2 kuvaa kaasun imua kompressoriiin, 2-3 kaasun puristusta ja 3-4 paineistetun kaa- sun poistoa kompressorista. Kuva on yleispätevä kaikille kompressorimalleille. Kuvassa oleva pisteiden 1-4 ja  $p$ -akselin rajaama pinta-ala on puristusprosessin tarvitsema energia. [1]



**Kuva 5-6.** Kompressorin puristusprosessi  $pV$ -tasossa. [1]

Kaasun puristukseen tarvittava työ voidaan määrittää kaavan 5.2 mukaan kuvan 5-4 merkinnöillä

$$W_p = p_1 V_1 \frac{n}{n-1} \left[ \left( \frac{p_4}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (5.2)$$

Kuvasta 5-4 huomataan, että puristukseen tarvittava energia on pienimmillään silloin, kun puristus tapahtuu isotermisesti. Käytännössä tämä toteutetaan kompressorin tehok- kaalla välijäähdytyksellä, jolloin kaasun lämpötila saadaan pidettyä mahdollisimman vakiona eri vaiheiden välillä. Korkeisiin puristussuhteisiin mentäessä kaasu kuitenkin



lämpenee enemmän, joka aiheuttaa lämpörasituksia sekä mahdollisia putkiston kuume-nemisia. Oletettaessa kompressorin menevä kaasun tilavuusvirta vakioksi, sijoittamalla kaasun tilavuusvirta  $\dot{V}_1$  yhtälöön 5.1 tilavuuden tilalle ja sijoituksella  $n=1$ , saadaan kaa-sun puristustyön tarvitsema isoterminen teho  $P_{isot.}$ . Kaasun puristukseen kompressorin tarvitsema kokonaisteho  $P$  saadaan kaavasta 5.1 sievennettyä muotoon

$$P = \frac{P_{isot.}}{\eta_{isot.}} = \frac{1}{\eta_{isot.}} p_1 \dot{V}_1 \ln \frac{p_4}{p_1} \quad (5.3)$$

jossa  $\eta_{isot.}$  kuvaa kompressorin isotermistä hyötysuhdetta. Isotermisen hyötysuhteen arvo vaihtelee välillä 0,5-0,75. [1]

Energiakulutuksen kannalta on oleellista toteuttaa puristus vaiheittain siten, että jokai- sessa vaiheessa paine kasvaa yhtä paljon. Tällöin puristussuhde  $\frac{p_4}{p_1}$  pysyy vakiona, joka johtaa siihen, että jokaisessa paineistusvaiheessa tarvittava puristustyö pysyy vakiona ja tarvittava puristustyö saadaan kertomalla ensimmäisen vaiheen tarvitsema työ vaiheiden lukumäärällä. Pienempi puristussuhde tarkoittaa myös pienempää lämpötilan kasvua vaiheiden välillä josta seuraa se, että puristukseen tarvittava työ on minimissään ja lä- hellä isotermistä puristusta. Liitteessä 8 olevassa kaaviossa on esitetty puristustehon- tarve eri painesuhteilla puristuksen tapahtuessa isotermisesti ja isentrooppisesti. [1]

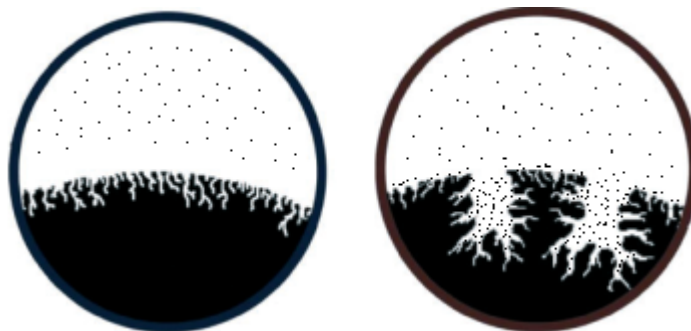
Biometaanin tuotannossa paineistuksen tarvitsema teho liitetään yleensä yhteen puhdis- tusenergian tarpeen kanssa ja se ilmaistaan muodossa kWh/Nm<sup>3</sup> biokaasua tai biome- taania. Kirjallisuudessa jo toimivien biometaanin tuotantolaitosten paineistusenergian tarpeeksi 200 bar painetasolle on ilmoitettu noin 0,11 kWh/Nm<sup>3</sup> raakabiokaasua [6], joka vastaa noin kolmannelle kokonaisenergian tarpeesta raakabiokaasun käsittelyssä CBG:ksi, riippuen käytetystä puhdistustekniikasta. Käyttämällä kaavaa 5.2 isotermisen hyötysuhteen arvolla  $\eta_{isot.} = 0,75$  päästään 1% tarkkuudella kirjallisuudessa esitettyyn arvoon.

## 5.4.2 ABG

Johtuen metaanin kemiallisista ja fysikaalisista ominaisuuksista mielenkiinto tutkia muita varastointimenetelmiä kuin paineistettua tai nesteytettyä metaania on herännyt. Koska metaania ei voida nesteyttää ilman lämpötilan laskua ja paineistus on energiantensiivinen prosessi, metaanin adsorptio kiintoaineeseen voisi olla kolmas vaihtoehto joka pienentää olemassa olevien tekniikoiden haittapuolia.

Kaasumaisen biometaanin adsorptio kiinteään aineeseen perustuu huokoisen materiaalin pintarakenteeseen sekä molekyylien välisiin heikkoihin vuorovaikutusvoimiin. Kiinteä aine, adsorbentti, on yleensä aktiivihiili tai muu huokoinen materiaali, kuten metalli-or- gaaninen runko Metal-Organic Framework MOF. Adsorption kannalta materiaalin tär- keät ominaisuuksat ovat selektiivisyys, palautettavuus sekä ominaispinta-ala massan

suhteen [12,14]. Kuvassa 5-7 kuvataan adsorptiota epätäydelliseen kiinteän aineen pintaan.



**Kuva 5-7.** Kaasun adsorptio adsorbenttiin. Kuva muokattu lähteestä [12].

Biometaanin varastoinnin kannalta adsorption hyödyntäminen johtaisi matalampaan painetasoon. Varastoinnin painetaso ABG-säiliössä on 35-60 bar riippuen adsorbentista, ja niiden varastoinnin tilavuussuhde tilavuus NTP-tilassa per tilavuus säiliössä, V/V, on noin 150-310, joka vastaa noin 150-310 bar CBG-säiliön tilavuussuhteita verrattuna biometaanin tilavuuteen normaalissa ilmanpaineessa. Painetason lasku johtaa noin 33% säästöön paineistusenergiassa. [12,43]

ABG-tekniikan tutkimuksissa adsorbentille on havaittu seuraavat kriteerit [43]:

1. Korkea adsorptiokapasiteetti
2. Korkea adsorption ja desorption suhde
3. Huokoisuuden raja-arvo  $\geq 0,8$  nm, joka helpottaa desorptiota huoneenlämmössä
4. Korkea pakkaustiheys, joka johtaa korkeaan energiatihyyteen
5. Matala adsorption lämpöarvo ja korkea ominaislämpökapasiteetti
6. Hyvät massansiirto-ominaisuudet
7. Materiaalin on oltava vettä hylkivää
8. Edullinen

ABG-tekniikan käyttämä matalampi painetaso johtaa myös muihin käytännöllisiin etuihin. Koska pienempi painetaso tarkoittaa pienempää räsitusta säiliön rakenteille, voidaan ABG-säiliö rakentaa kevyemmistä materiaaleista eikä sen tarvitse välttämättä olla sylinterin muotoinen, kuten CBG-säiliön. Tämä mahdollistaa autovalmistajille uusia mahdollisuuksia ajoneuvojen suunnitteluun.

### 5.4.3 LBG

Nesteytetyn biometaanin, LBG, tuotanto liitetään yleensä biokaasun kryojalostukseen. Koska menetelmässä biokaasu viilennetään noin -80 °C lämpötilaan hiilidioksidin poistoa varten, jalostusmenetelmää on perusteltua käyttää myös nesteytetyn biometaanin tuotantoon. Menetelmän etuna on myös siitä saatavan nestemäisen hiilidioksidin talteenotto,

jolle on myös olemassa omat käyttökohteet ja markkinat. Nesteytettyä biometaania voidaan tuottaa myös käyttämällä muita biokaasun puhdistus- ja jalostusmenetelmiä, riippuen biokaasun alkuperästä ja koostumuksesta.

Nesteytetyn biometaanin suurin etu verrattuna kaasumaiseen olomuotoon on sen kuljetukseen tarvittavan energian vähentyminen. Koska nesteytys vaatii huomattavasti enemmän energiaa kuin biokaasun jalostus muilla menetelmillä, sen tuotanto on yleensä kannattavaa vain silloin kuin biometaanin tuotanto- ja käyttöpaikat ovat kaukana toisistaan tai biometaanin siirto kaasumaisessa olomuodossa ei ole syystä tai toisesta käytännöllisesti mahdollista. LBG:tä voidaan käyttää myös raskaan liikenteen polttoaineena sellaisenaan.

LBG:n kuljetus maantiellä toteutetaan tyhjiöeristetyissä paineistetuissa säiliötrailerissa. Niiden kapasiteetti on noin  $56 \text{ m}^3$ , joka vastaa noin  $33000 \text{ Nm}^3$  biometaania. Lämpöhäviöistä johtuva biometaanin paineistuminen ja vuoto ympäristöön on noin 1% vuorokaudessa. [25]

Nesteytetyn biometaanin tuotanto kuluttaa sähköä noin  $0,8\text{--}1,5 \text{ kWh/Nm}^3$  biokaasua, joka on noin 3-5 kertainen verrattuna muihin puhdistusmenetelmiin ja paineistukseen CBG-käyttöön. Menetelmät eivät myöskään sovellu yhtä joustavasti pienen mittakaavan tuotantoon.

Suomeen tulleet investoinnit LNG-terminaaleihin voisivat myös edesauttaa LBG:n käytön ja kysynnän yleistymistä. Gasumin tytäryhtiö Skangas toimittaa LNG:tä merenkulun, teollisuuden ja raskaan maantieliikenteen tarpeisiin. Suomeen avattiin ensimmäinen LNG-tuontiterminaali Porissa vuonna 2016 [15]. Työ- ja elinkeinoministeriö on tukenut LNG-terminaalien rakentamista Suomessa yhteensä 93 miljoonalla eurolla, ja uusia terminaaaleja suunnitellaan Tornioon, Raumaan sekä Haminaan. LNG-terminaalit tuovat maakaasua kaasuverkon ulkopuolelle, joka avaa myös uusia mahdollisuuksia LBG:n tuotannolle.

#### **5.4.4 Bio- ja maakaasuputkistot**

Puhdistettu biokaasu kuljetetaan yleisimmin erillisessä biokaasuputkistossa, josta kaasua voidaan jaella paikallisesti tai pienien välimatkojen päähän. Biokaasulaitoksen tuotantoalueella myös raaka reaktorikaasu siirretään matalapaineisessa biokaasuverkossa laitoksen eri osien välillä. Biometaaniksi jalostettua biokaasua voidaan siirtää putkistoissa, maakaasun metaaniverkossa tai paineistetussa CBG-trailerissa maantiellä. [28]

Putkisiirtoa voidaan käyttää biokaasun siirtoon missä tahansa kaasun jalostusasteessa. Paikallinen biokaasuverkko on mahdollista toteuttaa tuotantolaitoksen ja käyttäjien välille, jossa käyttäjille jaetaan joko puhdistettua biokaasua tai biometaania. Paikallinen ja-

keluverkko mahdollistaisi erilaisten käyttötärpeiden täyttämisen alueellisesti, koska esimerkiksi asuinalueen sisällä käyttäjä voisi asentaa oman CHP-yksikkönsä omakotitaloonsa tai biometaanin tankkausaseman [28]. Biokaasuputkistot soveltuvat käytettäväksi noin 10 kilometrin mittaiselle, paikalliselle biokaasuverkolle.

Siirto paineistettuna sopii parhaiten jalostetun biometaanin siirtoon, mutta onnistuu myös puhdistetulle biokaasulle. CBG-kuljetus onnistuu myös esimerkiksi rautatie- tai meriliikenteen avulla [28]. Biometaanin siirto nesteytettynä LBG:nä on kannattavaa vain suurten etäisyyksien välillä, etäisyyden ollessa noin 600 kilometriä [25]. Tämän työn luvussa 6.3 käsitellään tarkemmin biometaanin siirron energiatehokkuutta.

Suomen korkeapaineinen maakaasuverkosto kattaa Kaakkois-Suomen, yltäen Imatralta pääkaupunkiseudun kautta Tampereelle asti. Siirtoverkosto koostuu pinnoitetuista teräsputkista. Verkoston varrella on kompressoriasemia kaasun paineen nostoon, putkiston tyhjennykseen tarkoitettuja venttiiliasemia, valvontaan tarkoitettuja linkkiasemia sekä paineenvähennysasemia, joiden avulla korkeapaineinen kaasu jaetaan paikallisiin verkkoihin käyttäjälle sopivassa paineessa. Verkkoon tuleva maakaasu on peräisin yhdestä liityntäpisteestä Venäjältä, ja Suomessa biokaasua syötetään kaasun siirtoverkkoon neljältä biokaasulaitokselta. [15,52]

## 6. LASKENNALLISET MENETELMÄT

Tässä kappaleessa tarkastellaan erilaisten biometaanin ja biokaasun tuotanto- ja käyttökohteisiin liittyviä tunnuslukuja sekä vertaillaan erilaisia skenaarioita laskennallisin menetelmin. Laskennoista saatuja tuloksia voidaan hyödyntää esimerkiksi biometaanin tuotantolaitoksen teknis-taloudellisessa suunnittelussa sekä tiettyjen komponenttien ja prosessilaitteiden mitoituksessa. Laskennoissa käytetty data on lähtökohtaisesti saatu jo olemassa olevista biometaanin tuotantolaitoksista ja alan kirjallisuustutkimuksista.

Luvun osiot 1, 2 ja 4 keskittyvät tarkastelemaan biometaanin tuotantohintoja eri tekniikoilla. Osiossa 3 tarkastellaan biometaanin varastointiin liittyviä tekijöitä, sekä arvioidaan eri teknologioiden vaikutusta biometaanin käyttöön. Osiossa 3 esitellään myös biometaanin liikennepolttoaineen tankkausaseman suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä.

### 6.1 Case 1 – Säilörehusta liikennepolttoaineeksi kahdessa eri skenaariossa

Tässä osiossa tarkastellaan biometaanin tuotantoa säilörehua syötteenä käyttävässä biokaasulaitoksessa. Tarkastelu toteutetaan kahdessa eri skenaariossa: ensimmäisessä tutkitaan energiaomavaraisuuteen pyrkivän maatilan biometaanin tuotannon kannattavuutta, kun korvattavina energialähteinä ovat polttoöljy sekä liikennebenssiini. Toisena skenaariona tarkastellaan biometaanin myyntiin suunniteltua biokaasulaitosta, jossa kaikki tuotettu biometaanin myydään liikennepolttoaineeksi. Yhteistä skenaarioille ovat tuotannon riippuvuus laitoksella käytetyn nurmen peltopinta-alaan, reaktoriyypin sekä puhdistus- ja jalostusteknologioiden välinen vertailu ja käytetyn nurmen sekä käsittelyjäännöksen rahallinen arvo.

Laskennassa määritetään skenaarioissa määritetyin parametrein tuotetun biometaanin tuotantokustannus sekä laitoksen investoinnin takaisinmaksuaika. Tarkoitus on selvittää tuotantotilan peltopinta-alaan yhteys tuotannon kustannuksiin sekä prosessin hyötysuhteen vaikutus kannattavuuteen. Laitoksen investointikustannuksia arvioidaan jo rakennettujen laitosten perusteella, sekä puhdistus- ja jalostusteknologioiden käyttökustannuksia suomalaisessa toimintaympäristössä. Biokaasulaitoksille saatavat investointi- ja syöttötariffit huomioidaan. Tulosten yhteydessä arvioidaan myös mahdollisen teoreettisen biometaanin tuotantotuen vaikutusta toiminnan kannattavuuteen. Taulukossa 6.1 on esitetty molempien skenaarioiden laitosten mitoituksessa käytetyt lähtötiedot.

**Taulukko 6.1.** Osiossa käytettyjen biokaasulaitosten suunnitellut tuotantoparametrit.

<i>Parametri</i>	<i>Skenaario 1</i>	<i>Skenaario 2</i>
<i>Vuosituotanto [MWh]</i>	1000	10,000
<i>Biokaasun metaanipitoisuus [%]</i>	55	55
<i>Vuotuiset käyttötunnit [h]</i>	8000	8000
<i>Tuotantokapasiteetti [<math>\frac{Nm^3}{h}</math>]</i>	25	225
<i>Kaasun teho [kW]</i>	125	1250
<i>Tarvittava peltopinta-ala [ha]</i>	50	500
<i>Tuotanto</i>	CHP + Biometaani	Biometaani

Biokaasulaitoksen rakennuksesta ja käytöstä aiheutuvat kustannukset arvioidaan reaktori-tyypin ja jalostus- ja puhdistusmenetelmän mukaan. Laitosten kokonaiskustannuksia vertaillaan laskemalla laitoksessa tuotetun biometaanin tuotantokapasiteetin mukainen kokonaishinta, joka esitetään muodossa tai €/MWh. Kaikkia tuotantokustannuksiin vaikuttavia tekijöitä ei tarkastelussa voida huomioida tarkasti, kuten tontin tai huolto- ja operointikustannusten hintaa. Tarkastelussa on tarkoitus vertailla eri teknologioita sekä tuotannon volyymin vaikutusta käyttökustannuksiin, joten tietyt tuotanto- ja pääoma-kustannukset oletetaan olevan samoja molemmissa eri skenaarioissa sekä kaikissa eri variaatioissa.

Reaktori-tyyppien väliset erot huomioidaan määrittämällä prosessin kokonaishyötysuhde. Koska kaikista reaktori-tyypeistä olevaa käyttödataa ei ole Suomen olosuhteista vielä riittävästi saatavilla, tämän muuttujan avulla voidaan mallintaa eri reaktori-tyypeillä saatavia tuotantomääriä ja kassavirtoja. Prosessin kokonaishyötysuhde kuvaa prosessin tarvitseman sähkö- ja lämpöenergian osuutta reaktorissa tuotetusta biokaasun energiamäärästä. Huomioitavaa biometaanin kaupallisessa tuotannossa on se, että mistä prosessienergia hankitaan. Omavaraisuuteen pyrkivän tilan, skenaarion 1, tapauksessa CHP-yksikkö kattaa prosessilämmön tarpeen täysin ja reaktori-työtysuhteet oletetaan jo toiminnassa olevien biokaasulaitosten kaltaisiksi. Liitteessä 8 esitetään osiossa käytetyt laskentaparametrit, oletukset, lähtötiedot sekä laskukaavat.

### 6.1.1 Skenaario 1

Omavaraiseen energiatuotantoon pyrkivää maatilaa kuvaavan skenaarion 1 lähtötiedot on esitetty taulukossa 6.2. Nurmen hankintahinnaksi on määritetty 0, koska biokaasureaktorin tarvitsema nurmi oletetaan saatavaksi pelloilta ilman lisäkustannusta verrattuna tilalla jo ennen investointia olevaan toimintaan. Prosessienergiaa ei myöskään hankita laitoksen ulkopuolelta. Tila on oikeutettu 40 prosentin investointitukeen, koska kaikki tuotettu energia käytetään itse.

**Taulukko 6.2.** Skenaario 1:n laskennassa käytetyt investointi- ja käyttökustannukset.

<i>Investointikustannukset</i>	<i>€</i>	<i>Käyttökustannukset</i>	<i>€</i>
Reaktori [33]	400,000	Nurmen hankinta	0
Puhdistus & Jalostus [33]	100,000	Operointi ja huolto	5000
CHP-moottori [51]	2200€/kW <sub>el</sub>	Jalostus biometaaniksi [45]	0,32 kWh/Nm <sup>3</sup>
SOFC-moduuli [45]	3050€/kW <sub>el</sub>	Prosessienergia	0

Halukkuus biokaasulaitoksen investointiin lähtee tarpeesta korvata maatilalla lämmitysenergian tuotantoon käytetty polttoöljy sekä tuottaa maatilan oma sähkö paikallisesti. Laitoksen tuotannon pohjaksi on valittu 50 hehtaarin nurmisato, josta oletetaan saavan keskimäärin 1000 MWh raakabiokaasua vuosittain. CHP-tuotanto voidaan valita kahdesta eri vaihtoehdosta: käyttämällä CHP-moottoria, jossa sähköntuotannon hyötysuhde on 28% ja lämmöntuotannon hyötysuhde 62% [28], tai käyttämällä kiinteäoksidista SOFC-polttokennoa, jonka vastaavat hyötysuhteet ovat 51% ja 37% [45]. Koska moottorilla ja polttokennolla sähkön- ja lämmöntuotannon suhteet ovat täysin päinvastaiset, täytyy valinta niiden välillä tehdä myös oman tarpeen mukaan. Olipa valinta kumpi tahansa, vuosittaisesta biokaasutuotannosta käytetään myös noin 5-6% kattamaan tilan omien henkilöautojen ja työkoneiden liikennepolttoaineen tarve. Taulukossa 6.2 esitetyt investointihinnat ovat määritetty kirjallisuudessa esitettyjen, tämän hetkisten pienen mittakaavan tuotannon mukaan ja ne sisältävät kaiken käyttöön tarvittavan laitteiston.

Käytettäessä CHP-moottoria, tuotannon taso on valittu siten, että tuotannosta jää netto-lämpöenergiaa tilan omaan käyttöön 380 MWh. Tällöin CHP-moottorin tarvittavaksi tehoksi tulee 33 kW<sub>el</sub>. Oletuksena on, että kaikki tuotettu lämpö ja sähkö korvaavat ostettua polttoöljyä sekä sähköä. Taulukossa 6.3 kuvataan tuotannon jakaumaa sekä tuotetun biokaasun ja biometaanin tuotantohintaa CHP-moottorilla sekä SOFC-kennolla.

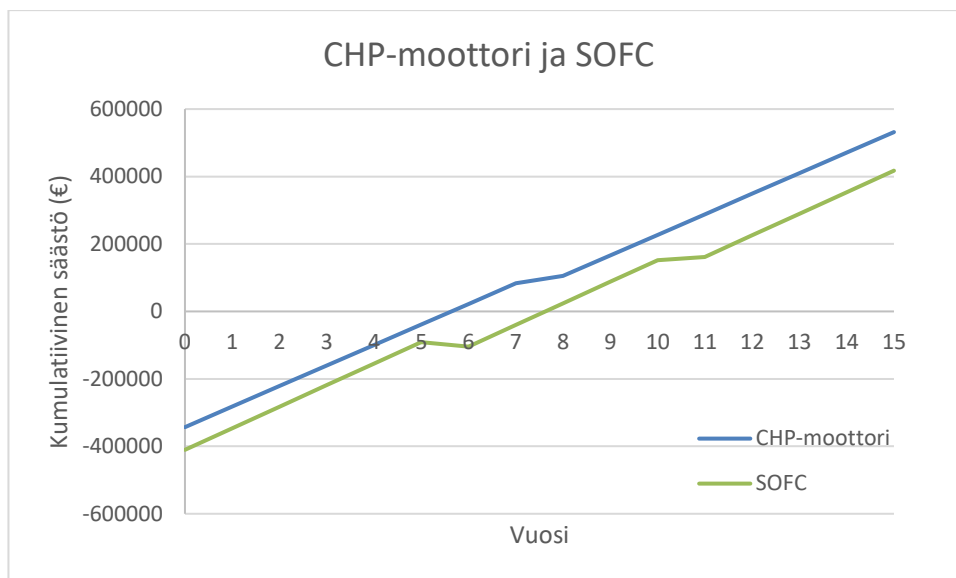
**Taulukko 6.3.** *CHP-moottorilla tai SOFC-kennolla varustetun biokaasulaitoksen vuosittainen tuotantojakauma ja kaasujen tuotantohinnat.*

<b>Biokaasulaitos CHP-moottorilla</b>			
<i>Lämpö [MWh]</i>	580	<i>Biokaasun hinta [€/MWh]</i>	21,47
<i>Sähkö [MWh]</i>	261,94	<i>Biometaanin hinta [€/MWh]</i>	71,63
<i>Biometaani [MWh]</i>	63,87	<i>Jalostuksen hinta [€/MWh]</i>	50,16
<b>Biokaasulaitos SOFC-kennolla</b>			
<i>Lämpö [MWh]</i>	350	<i>Biokaasun hinta [€/MWh]</i>	32,11
<i>Sähkö [MWh]</i>	482,43	<i>Biometaanin hinta [€/MWh]</i>	83,75
<i>Biometaani [MWh]</i>	53,51	<i>Jalostuksen hinta [€/MWh]</i>	51,64
<i>Tuotetun nettosähkön hinta [€/MWh] CHP-moottori</i>	163,49	<i>Takaisinmaksuaika CHP-moottori</i>	6
<i>Tuotetun nettosähkön hinta [€/MWh] SOFC-kenno</i>	97,04	<i>Takaisinmaksuaika SOFC-kenno</i>	8

SOFC-kennoa käyttävä biokaasulaitos mitoitetaan siten, että nettolämpöä maatilalle jää 150 MWh. Tällöin SOFC-kennon tehoksi tulee 61 kW<sub>el</sub>. Kennon käyttöiäksi arvioidaan 5 vuotta, joka tarkoittaa, että kenno tulee uusia 3 kertaa reaktorin käyttöiän aikana. Kennon hinnan oletetaan laskevan 30% edellisestä jokaisen uusinnan yhteydessä. Muuten oletukset ovat samat, kuin CHP-moottoria käytettäessä. Tuloksista huomataan, että SOFC-kennon käyttö pienessä mittakaavassa on Suomessa perusteltua vain silloin, kuin sähköä tarvitaan hajautetussa sovelluksessa paljon. Käytettäessä CHP-moottoria lämpö saadaan tuotettua huomattavasti polttoöljyä edullisemmin, ja sähkön nettohinta on ostettuun sähköön nähden, siirto huomioiden, pääosin sama. Lämmön tuotanto SOFC-kennolla soveltuu vain pääasiallisesti biokaasureaktorin oman lämpöenergian tarpeen kattamiseen sekä lisäksi jonkin muun lämmönlähteen yhteyteen. Suurin rahallinen potentiaali biokaasun tuotannossa liittyy kuitenkin jalostukseen biometaaniksi, jossa tuotetun biometaanin hinta laskee kasvavan tuotantomäärän mukana sekä on kannattavaa myös pienessä mittakaavassa.

Kuvassa 6.1 kuvataan skenaariossa kuvattujen biokaasulaitosten tuottamaa kumulatiivista säästöä. Takaisinmaksuaika CHP-moottorilla olevassa laitoksessa on 6 ja SOFC-kennolla 8 vuotta.





**Kuva 6-1.** Biokaasulaitoksen tuottama kumulatiivinen säästö ja takaisinmaksuaika CHP-moottorilla ja SOFC-kennolla verrattuna ostettuun öljyyn (85 €/MWh) ja sähköön (120 €/MWh).

### 6.1.2 Skenaario 2

Biometaanin kaupallista tuotantoa tarkastelevan skenaarion 2 lähtötiedot on esitetty taulukossa 6.4. Investointikustannukset ovat laitoksen komponenttien ostohinnat, käyttökustannukset ovat vuosittaisia muuttuvia kustannuksia. Parametri  $\eta$  kuvaa laitoksen tuottaman nettoenergian määrää.

**Taulukko 6.4.** Skenaario 2:n laskennassa käytetyt investointi- ja käyttökustannukset. Parametri  $\eta$  kuvaa laitoksen tuottaman nettoenergian määrää.

Investointikustannukset	€	Käyttökustannukset	€/a
Reaktori	1,600,000 [45,47]	Nurmen hankinta	260,000 [47]
Puhdistus & Jalostus	1,600,000 [45]	Operointi ja huolto	100,000 [45]
Hake/kaasukattila	150,000	Jalostus biometaaniksi	Riippuu $\eta$ :sta
Investointituki	-28%	Prosessienergia	Riippuu $\eta$ :sta
Yhteensä	2,412,000	Investointipoistot	160,800

Investointipoistot on määritetty tehtäväksi 15 vuoden tasapoistolla täysin omalla pääomalla. Biometaanin puhdistus- ja jalostuskuluksi CBG-käytössä on määritetty 0,32 kWh/Nm<sup>3</sup> [45], joka kattaa käytännössä kaikki erilaiset jalostusteknologiat [28,33,45]

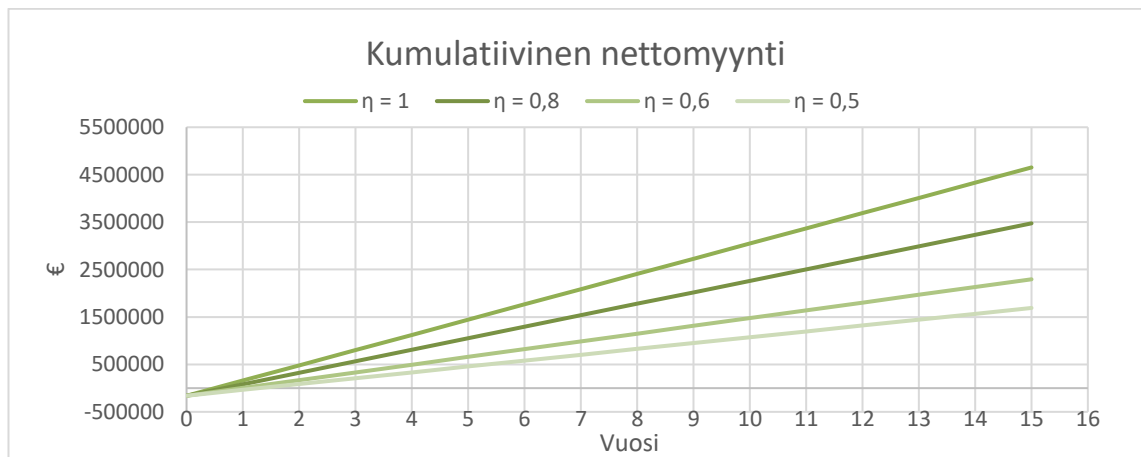
sekä kaasun paineistuksen CBG-käyttöön. Investointikustannusten pohjana on käytetty vesipesurijalostusta ja muita jo rakennettuja biokaasureaktoreita [28,33,45] ja rikinpoisto oletetaan sisältyväksi reaktorin hintaan. Prosessin hyötysuhde on määritetty kaavan

$$\eta_p = 1 - \frac{E_{sähkö} + E_{lämpö}}{E_{biokaasu}} \quad (6.1)$$

mukaan. Jalostuksessa biometaanin häviöksi on arvioitu 1% ja prosessienergian suhde sähkö/lämpö 1/3 [28,33]. Taulukossa 6.5 kuvataan tuotantohintoja eri prosessihyötysuhteen arvoilla käytettäessä ulkopuolista prosessilämmön tuotantoa ja taulukossa 6.4 käytettäessä biokaasua prosessilämmön tuotantoon. Kuvaajat 6-2 ja 6-3 kuvaavat laitoksen kumulatiivista nettomyyntiä eri prosessihyötysuhteilla sekä prosessienergian lähteillä.

**Taulukko 6.5.** Skenaariossa 2 määritetyt tuotantohinnat ja takaisinmaksuaajat käytettäessä haketta prosessilämmön tuotantoon.

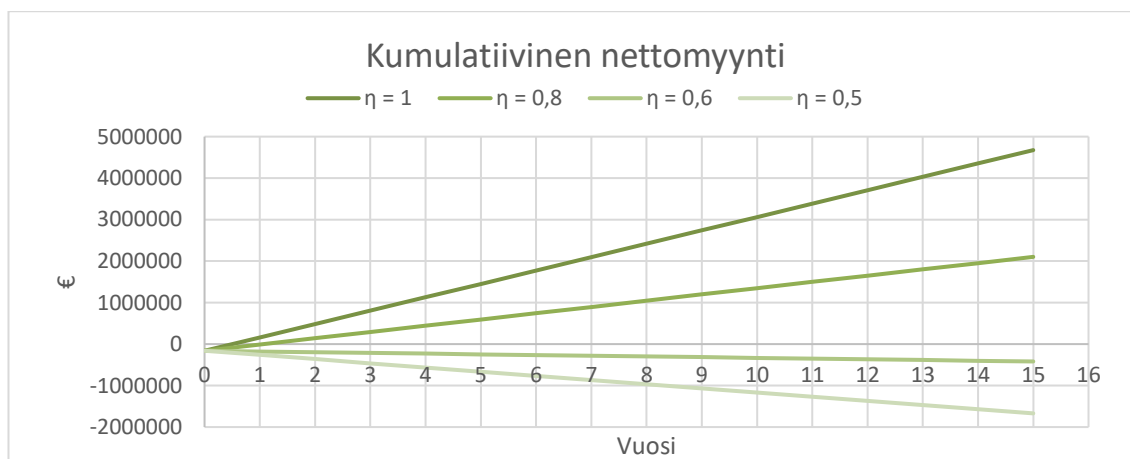
$\eta_p$	Biokaasun tuotantohinta	Biometaanin tuotantohinta	Takaisinmaksuaika
1	42,29 €/ MWh	57,60 € / MWh	8 v
0,8	50,33 €/ MWh	65,64 €/ MWh	10 v
0,6	58,37 €/ MWh	73,55 €/ MWh	15 v
0,5	62,28 €/ MWh	77,60 €/ MWh	20 v



**Kuva 6-2.** Kumulatiivinen nettomyynti eri hyötysuhteen arvoilla käytettäessä haketta prosessilämmön tuotantoon. Parametri  $\eta$  kuvaa laitoksen tuottaman nettoenergian määrää.

**Taulukko 6.6.** Skenaariossa 2 määritetyt tuotantohinnat ja takaisinmaksuajat käytettäessä biokaasua prosessilämmön tuotantoon.

$\eta_p$	Biokaasun tuotantohinta	Biometaanin tuotantohinta	Takaisinmaksuaika
1	42,08 €/ MWh	57,60 €/ MWh	8 v
0,8	46,58 €/ MWh	72,16 €/ MWh	16 v
0,6	50,99 €/ MWh	92,46 €/ MWh	-
0,5	53,18 €/ MWh	106,05 €/ MWh	-



**Kuva 6-3.** Kumulatiivinen nettomyynti eri hyötysuhteen arvoilla käytettäessä biokaasua prosessilämmön tuotantoon. Parametri  $\eta$  kuvaa laitoksen tuottaman nettoenergian määrää.

Skenaarion 2 laskennasta käy ilmi, että käytettäessä haketta prosessienergian tuotantoon tuotetun biokaasun hinta nousee prosessihyötysuhteen heikentyessä, mutta jalostukseen liittyvät kustannukset pysyvät vakiona, noin 15€/MWh. Mikäli prosessienergia tuotetaan biokaasulla, sekä biokaasun että biometaanin tuotantohinnat nousevat johtuen pienentyneestä myyntiin päätyvästä biometaanin määrästä sekä kohonneesta sähkön kulutuksesta. Takaisinmaksuajoista nähdään, että investointi biometaanin kaupalliseen tuotantoon millään menetelmällä nykyisellä myyntihinnalla ei ole kovin houkuttelevaa ilman tuotantotukea tai muita vakuuksia. Käytettäessä haketta prosessilämmön tuotantoon biometaanin tuotantohinta pysyy myyntihinnan alapuolella heikommillakin prosessihyötysuhteilla. Koska investointikustannukset ovat pienemmät kuin käyttöön liittyvät muuttuvat kustannukset, tuotantoperusteinen tuki biometaanin tuotannolle olisi hyödyllisempi kuin laitoksen investointituki.

## 6.2 Case 2 – Synteettisen biometaanin tuotanto Suomen markkinoilla

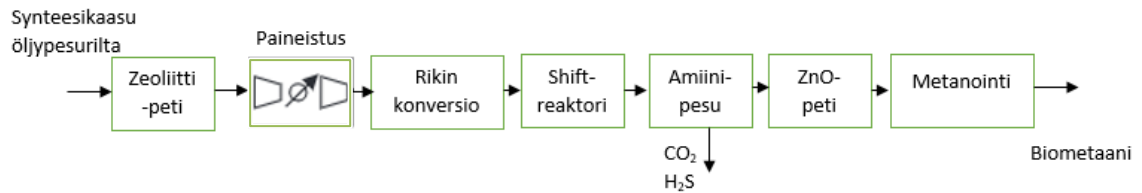
Tässä osiossa tarkastellaan synteettisen biometaanin tuotantoa Suomen markkinoilla. Suomessa biomassan kaasutukseen perustuvaa biometaanin tuotantoa ei vielä ole. Ruotsissa on toiminnassa kolme puuhakkeen kaasutukseen perustuvaa tuotantolaitosta, joiden prosesseista on julkaistu tutkimuksia, konversion tunnuslukuja sekä laitteistojen investointikustannuksia.

Biomassan kaasutukseen perustuva synteettisen biometaanin tuotanto on merkittävä askel kohti hiilineutraalia energiamarkkinaa. Tuotannon volyymi on korkea, ja jo yksi 750 GWh/a tuotantolaitos pystyisi kaksinkertaistamaan Suomen biokaasun ja biometaanin yhteenlasketun tuotannon vuoden 2015 tasolta. Suomessa on myös merkittävä määrä sellun tuotantoa, jonka yhteyteen voitaisiin liittää mustalipeän kaasutukseen perustuvaa biometaanin tuotantoa. Osiossa tarkastellaan energiapuun, hakkeen, käyttöä biometaanin tuotantoon ja toimintaan sekä arvioidaan, millaisilla tuotantotukijärjestelmillä tuotanto voidaan saada taloudellisesti kannattavaksi.

Mustalipeän kaasutuksen tarkastelu keskittyy arvioimaan sellutehtaan prosessia, jossa Chemrec-suspensiokaasutin asennetaan tehtaan soodakattilan rinnalle. Kaasutuksessa muodostunut synteetikaasu jatkojalostetaan biometaaniksi. Tarkastelun tarkoituksena on selvittää niin kutsutussa biotuotetehtaassa tuotetun biometaanin tuotannon kannattavuutta, ja vertailla näin tuotetun biometaanin hintaa verrattuna muihin tuotantomenetelmiin. Osiossa tarkastellaan myös kaasutuksen energiatehokkuutta sekä verrataan tuotannon myyntiä verrattuna sähkön myyntiin.

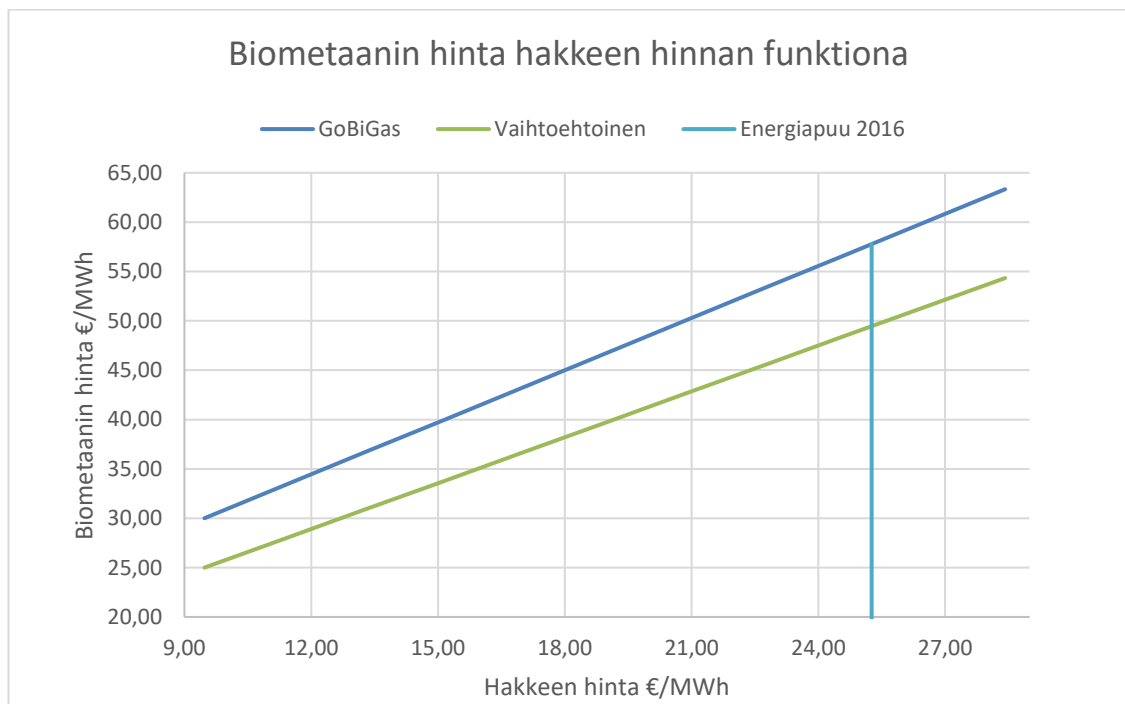
### 6.2.1 Biomassan kaasutus ja metanointi

Ruotsalaisen Göteborgin energian GoBiGas-hankkeessa esittämä biometaanin tuotantolaitoksen prosessikaavio esitettiin luvussa 3.2.2 kuvassa 3-11. Laitoksen kokonaisinvestointikustannukset ovat noin 101 miljoonaa euroa, ja se sai EU:n NER 300 -ohjelmasta investointitukea noin 58 miljoonaa euroa. Tutkimuksessa [19] esitettiin biometaanin tuotannolle erilainen, yksinkertaistettu prosessi, joka yhdistäisi prosessin komponentteja sekä poistaisi tiettyjä osia kokonaan luoden säästöjä käyttö- ja investointikustannuksiin. Kuvassa 6-4 esitetään vaihtoehtoinen prosessi biometaanin tuotannolle ja liitteessä 10 on yksityiskohtaisemmat prosessikaaviot kummastakin tarkastellusta prosessista.



**Kuva 6-4.** *Vaihtoehtoinen synteesikaasun konversioprosessi. Kuva muokattu lähteestä [19].*

Vaihtoehtoinen prosessi poistaa alkuperäisessä konfiguraatiossa olleet adsorptiopedit, olefiinien käsittely-yksikön ja esireformerin sekä lisää zeoliittipedin, jossa poistetaan kloori- ja typpiyhdisteet. Rikkiä konvertoiva HDS-yksikkö toimii korkeammassa lämpötilassa, jolloin olefiinit konvertoituvat alkeeneiksi samassa yksikössä. Alkuperäisessä prosessissa olevat  $\text{H}_2\text{S}$ - ja  $\text{CO}_2$ -poistoyksiköt yhdistetään yhteen uuteen amiinipesuriyksikköön. Shift-reaktorissa käytettävä katalyytti on vaihdettava rikkiä kestävä katalyytti. Prosessin metanointiyksikkö ilman esireformeria tarvitsee biometaanin takaisinkierrätyksen ensimmäiseen reaktoriin, jotta liian korkea lämpötilannousu reaktorin sisällä estetään. Muutoin prosesseissa ei ole eroja komponenttien välillä.



**Kuva 6-5.** *Hakkeen kaasutuksella tuotetun biometaanin hinta käytetyn hakkeen hinnan funktiona GoBiGas- sekä yksinkertaistetulla prosessilla [19]. Energiapuun 2016 on Suomen energiapuun hinnan keskiarvo vuoden 2016 viimeiseltä neljännekseltä [32].*

Kuvaaja 6-5 kuvaa GoBiGas-prosessissa tuotetun biometaanin tuotantohintaa käytetyn puubiomassan hinnan funktiona. Kuvaajaan on myös liitetty tuotantohinnan laskua kuvaavan vaihtoehtoisen prosessin suora sekä Suomessa vuonna 2016 energiapuun keskihinnan suora. Energiapuun keskihinta hankintakaupassa oli vuosineljänneksellä 4/2016

19,95 €/i-m<sup>3</sup> [32]. Hakkeen €/MWh-hinnan määrittämisen parametrit on esitelty liitteessä 10.

Hintajakaumasta huomataan, että alkuperäisen prosessin kiinteäksi investointikustannukseksi tulee 13,33 €/MWh ja vaihtoehtoisen 10,33 €/MWh. Vaihtoehtoisessa prosessissa myös muuttuvat kustannukset laskevat. Merkittävin tekijä biometaanin hinnassa onkin käytetyn energiapuun, hakkeen, hinta. Biometaanin loppupaine prosessin jälkeen on 30 bar kummassakin prosessissa. Koska biometaanin tuotanto tässä mittakaavassa Suomen liikennebiometaanin kysynnällä on reilusti ylijäämäinen, biometaanin käytössä pakko lisätä maakaasuverkkoon. Biometaanin myyntihinta ei kuitenkaan ole nykyisillä puubiomassan hinnoilla suoraan kilpailukykyinen maakaasun kanssa.

Johtuen biometaanin käytön suotuisista vaikutuksista, käytetyn maakaasun määrää olisi kuitenkin järkevää vähentää korvaavalla biometaanilla. Taulukkoon 6.7 on listattu erilaisten investointi- ja tuotantotukipakettien vaikutusta biometaanin tuotannon kannattavuuteen. Tuotantotuki ajatellaan biometaanin tuottajalle maksettavaksi kiinteäksi summaksi, joka peritään takaisin maakaasun verotuksessa. Laskenta on tehty maakaasun vuosikulutuksen 25 TWh sekä biometaanin tuotantolaitoksen 750 GWh vuosituotannon pohjalta.

**Taulukko 6.7** *Biometaanin tuotantohinta erilaisilla tukimenetelmillä käyttäen yksinkertaistettua GoBiGas-prosessia 25 €/MWh energiapuun hinnalla.*

	<i>Investointituki -50%</i>	<i>Investointituki -100%</i>	<i>Tuotantotuki 15 €/MWh</i>	<i>Tuotantotuki 25 €/MWh</i>
<b><i>Biometaanin tuotantohinta [€/MWh]</i></b>	43,87	38,70	34,04	24,04
<b><i>Maakaasun hinnan nousu [€/MWh]</i></b>	0	0	0,60	0,90

Biometaanin tuotantolaitos pienentäisi maakaasun käytöstä johtuvia CO<sub>2</sub>-päästöjä 148500 tonnia, joka olisi 3 prosenttia vuoden 2016 tasosta. Biometaanin tuotantolaitoksella on myös merkittävästi työllistävämpi vaikutus verrattuna tuotuun maakaasuun, koska laitoksen käyttämä hake tarvitsee merkittävästi kotimaista työtä. Maakaasun veroton hinta on työn kirjoitushetkellä toukokuussa 2017 27-33 €/MWh, riippuen käyttökohteen tarpeista [15]. Suomen hiilineutraalius-tavoitteiden saavuttamiseksi käytetyn maakaasun määrän vähentäminen on tärkeää.

## 6.2.2 Mustalipeän kaasutus ja metanointi

Sellu- ja paperitehtaat ovat yleisesti sähkön tuotannon suhteen ylijäämäisiä, joka johtuu sellun keitossa muodostuvasta mustalipeän määrästä. Prosessissa syntyy mustalipeää noin 1,7 kuivatonna, *t Black Liquor Solids BLS*, jokaista tuotettua sellutonna kohti [39]. Esimerkiksi Metsä Fibren Joutsenon sellutehdas tuottaa vuosittain 690 000 tonnia sellua 175% sähköenergiaomavaraisuudella [35], jolloin tehtaan mustalipeän päiväkohtainen tuotanto on noin 3200 t BLS/d. Mustalipeän Chemrec-kaasutuksella määrästä olisi mahdollista kaasuttaa noin 15%, 500 t BLS/d, ja jatkojalostaa tuotettu synteetikaasu biometaaniksi hyödyntäen osiossa 6.2.1 esitettyä GoBiGas-metanointiprosessia. Mustalipeän kuiva-aineen koostumus sekä tuotetun synteetikaasun koostumus on esitetty taulukossa 6.8.

**Taulukko 6.8** Mustalipeän kuiva-ainekoostumus [22] sekä sen Chemrec-kaasutuksessa syntyvän synteetikaasun koostumus [39]. Määrä prosenttiosuutena kuiva-aineesta.

<i>Mustalipeä</i>	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>S</i>	<i>Cl</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>
%-kuiva	36,4	3,5	34,3	0,14	4,8	0,24	18,6	2,02
<i>Synteetikaasu</i>	<i>CO</i>	<i>CO<sub>2</sub></i>	<i>H<sub>2</sub></i>	<i>H<sub>2</sub>S</i>	<i>CH<sub>4</sub></i>	<i>N<sub>2</sub></i>		
%-kuiva	38,1	19,15	39,19	1,91	1,35	0,3		

Korkean lämpötilan Chemrec-kaasutuksen ansiosta kaasutuksen energiatehokkuus on korkea. Mustalipeän kaasutuksen *CGE*-hyötysuhde on todettu tutkimuksissa olevan 0,96 [22], kun kaasutus tapahtuu 1000 °C lämpötilassa 30 bar paineessa höyryn SBR-määrän ollessa 0,6 kg<sub>höyry</sub>/kg<sub>ml</sub>. Kaasutuksen tunnuslukujen laskenta ja oletukset ovat esitetty liitteessä 10. Taulukkoon 6.9 on koottu biometaanin tuotantomäärä, kun vuotuinen käyttöaika on 6000 tuntia ja mustalipeän määrä 500 t BLS/d.

**Taulukko 6.9** Tuotetun synteetikaasun ja biometaanin vuosituotanto, kun kaasuttimen kapasiteetti 500 t BLS/d 6000h/a.

	<i>Mustalipeä</i>	<i>Synteetikaasu</i>	<i>Biometaan</i>
<i>Vuosituotanto [MWh]</i>	480555,56	461333,33	415200
<i>Konversio</i>	-	96 %	86,40 %

Konversion tehokkuudessa biometaaniksi ei ole huomioitu prosessienergian tarvetta, koska prosessi oletetaan samaksi kuin osion 6.2.1 yksinkertaistettu GoBiGas-prosessi. Mustalipeän hinnaksi oletetaan 0€. Kuumen synteetikaasun ja kaasuttimen tarvitseman höyryn energiataseesta huomataan, että synteetikaasun jäähtymisestä 40 celsiusasteeseen talteen otettava lämpöenergia kattaa kaasuttimen höyryntarpeen. Kaasuttimen toiminnasta ei täten tule ylimääräisiä energiankuluttajia verrattuna puubiomassan kaasutusprosessiin, jolloin tuotantojärjestelmät ovat keskenään vertailukelpoisia. Myös kaasuttimien investointikustannus on sama. Tällöin tuotetun biometaanin hinnaksi tulee 12,40 – 15,99 €/MWh, joka muodostuu prosessilaitteiston kiinteistä pääomakustannuksista sekä prosessilaitteiston energiantarpeesta. Prosessienergia tuotetaan myös sellutehtaassa pääosin soodakattilassa tai haketta polttamalla.

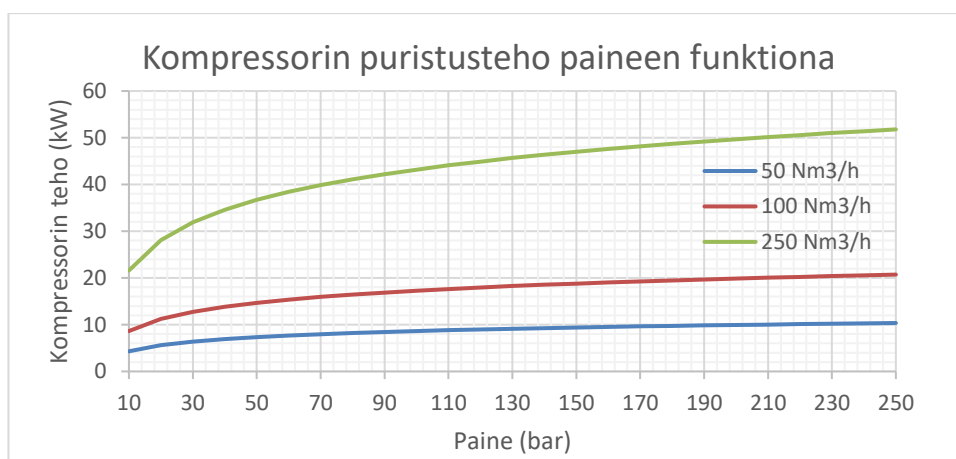
Chemrec-kaasuttimen kaupallistumisen esteenä on kuitenkin vielä kaasuttimen lämpöpintojen vuorauksen kesto. Vuotuiset käyttötunnit jäävät pieneksi, sekä kaasuttimen korjaus- ja huoltokulut nousevat suuriksi. Mustalipeän kaasutus on kuitenkin investointikustannuksiltaan halvempi ja energiatehokkaampi vaihtoehto sekä teknisesti sopiva sellutehtaan kemikaalikiertoa ajatellen. Kaasutinteknologian ja uusien materiaalien kehittyessä siitä voi tulla erittäin varteenotettava vaihtoehto verrattuna mustalipeän polttoon soodakattilassa. Hiilineutraaliuden kannalta biotuotetehtaiden sähkölle vaihtoehtoiset tuotteet voivat myös parantaa ympäristökestävyyttä, jos tuotteilla pystytään korvaamaan fossiilisia polttoaineita. Suomessa biometaanin tuotantopotentiaalia mustalipeän kaasutuksella on noin 6 TWh, mikäli 15% täällä tuotetusta mustalipeästä kaasutettaisiin ja jatkokäsitteläisiin biometaaniksi.

### 6.3 Case 3 – Biometaanin varastointi- ja kuljetusteknologioiden vaikutus käyttöön

Tässä osiossa tarkastellaan biometaanin varastointi- ja kuljetusteknologioita ja niiden välisiä eroja käyttökohteiden kannattavuuteen. Merkittävä osa biometaanin tuotannon kannattavuutta on sen varastointi- ja siirtotekniikoiden tarvitsema energia. Verrattuna perinteisiin nestemäisiin polttoaineisiin metaanin energiatiheys  $\frac{J}{m^3}$  on huomattavasti pienempi, noin 75% pienempi kuin liikennebensiniin.

Biokaasulaitoksessa biokaasun jalostus biometaaniksi sekä sen paineistus on merkittävä tekijä biometaanin tuotantohinnan muodostumisessa. Kuvaajassa 6-6 kuvataan erilaisten biometaanivirtojen paineistukseen tarvittavien kompressorien akselitehoja biometaanin loppupaineen funktiona. Käyrien arvot on määritetty käyttäen luvussa 5 esitettyä kaavaa 5.2 isotermisen hyötysuhteen arvolla  $\eta_{isot.} = 0,75$  4-vaiheisella puristuksella.





**Kuva 6-6.** Kompressorin tarvitsema akseliteho loppupaineen funktiona. [1]

Kuvasta 6-6 käy ilmi, että biometaanin varastoinnissa säästetään paineistuskustannuksissa noin 33%, mikäli sama biometaanimäärä pystytään varastoimaan ABG-tekniikan käyttämään 35 bar painetasoon verrattuna CBG-tekniikan käyttämään 200 barin painetasoon. Taulukkoon 6.10 on koottu tarvittavan paineistusenergian prosentuaalinen osuus varastoidusta biometaanista eri V/V-suhteilla hyödyntäen CBG- ja ABG-tekniikkaa 1 m<sup>3</sup>-suuruiseen säiliöön 15 celsiusasteen vakioämpötilassa. Varastoidun kaasun määrä CBG-säiliössä on laskettu metaanin puristuvuuskerroin huomioiden, jonka arvot on hankittu lähteestä [57], ja jonka arvoja on kuvattu paineen funktiona liitteessä 10. Biometaanin metaanipitoisuudeksi on oletettu 97%.

**Taulukko 6.10** Tarvittava paineistusenergia eri V/V-suhteilla ja painetasoilla biometaanin varastoinnissa 1 m<sup>3</sup>-suuruiseen säiliöön.

	Varastoitu määrä Nm <sup>3</sup>		Varastoitu energia kWh m <sup>3</sup>		Paineistuksen %-osuus varastoidusta energiasta	
Varastointipaine bar (V/V ABG)	CBG	ABG	CBG	ABG	CBG	ABG (35bar)
150	172,65	150	1674,73	1455	1,94%	1,38%
180	209,48	180	2031,92	1746	2,01%	1,38%
200	234,53	200	2274,95	1940	2,05%	1,38%
220	249,79	220	2422,95	2134	2,09%	1,38%
250	271,04	250	2629,04	2425	2,14%	1,38%

Tuloksista huomataan, että koska ABG-tekniikassa varastointipaine pysyy vakiona, myös paineistusenergian tarve kasvaa lineaarisesti paineistettavan tilavuusvirran mukana ja suhteellinen osuus varastoidusta biometaanista pysyy vakiona. Kaupalliset adsorptiomateriaalit eivät kuitenkaan vielä yllä vastaaviin V/V-suhteisiin tällä painetasolla, mutta tasolle pääseviä ja jopa sen ylittäviä materiaaleja tiedetään ja niitä tutkitaan lisää jatkuvasti. Standardiksi muodostunut 200 bar painetaso CBG-varastoinnissa johtaa noin 33% säästöön vaihdettaessa vastaavaan V/V-suhteeseen pääsevällä ABG-tekniikalla, joka johtaisi Case 1:ssä lasketun skenaarion 2 biometaanin tuotantolaitoksen tapauksessa noin 6000 euron vuosittaiseen säästöön. ABG-tekniikan kevyemmät säiliöt voidaan lisäksi olettaa edullisemmiksi kuin suuren paineen CBG-säiliöt, joten tekniikan kaupallistumisen kynnyksysmyykseksi tulee käytetyn adsorptiomateriaalin hinta sekä käytännön toimivuus eri sovelluksissa. Varastointiteknologioiden investointikustannukset ovat kuitenkin pieniä verrattuna muuttuviin kustannuksiin, joten paineistuskustannusten pienentäminen on tärkeämpää ja energiatehokkaampaa pitkällä tähtäimellä.

Tällä hetkellä biometaanin käyttö Suomessa keskittyy pääosin liikennekäyttöön. CHP-tuotanto ei tarvitse yhtä korkeaa biokaasun jalostusastetta. Toisaalta biometaania olisi mahdollista käyttää myös esimerkiksi kombivoimalaitoksessa erittäin korkean hyötysuhteen ja volyymin sähköntuotantoon, mikäli sille olisi taloudellisia edellytyksiä. Liikennekäytössä biometaani kilpailee perinteisten nestemäisten polttoaineiden kanssa, joka asettaa sen myynnille tietyt standardit, joihin asiakkaat ovat tottuneet. Murtautuakseen liikennepolttoainemarkkinoille biometaanin on oltava houkuttelevampi vaihtoehto, ja Suomessa suurin houkuttavuustekijä on tällä hetkellä polttoaineen myyntihinta. Myös kaasuautojen käytön on oltava käytännöllistä, joka tarkoittaa polttoaineen helppoa ja jatkuvaa saatavuutta ympäri Suomea. Koska tällä hetkellä kaasuautojen kaasuväkästöt perustuvat CBG-tekniikkaan, jonka avulla autoon voidaan varastoida vain noin neljännes bensiiniautossa olevasta energiamäärästä, tankkausasemien merkitys korostuu entisestään, koska asiakkaiden täytyy käyttää niitä selkeästi useammin kuin bensiiniautoilijoiden.

Keväällä 2017 Gasum otti Suomessa käyttöön kiinteähintaisen maa- ja biokaasun myynnin liikennepolttoaineeksi. Maakaasua myydään hintaan 69€/kk ja biometaania hintaan 89€/kk. Taulukkoon 6. on arvioitu Case 1 skenario 2:den mukaiseen biometaanin tuotantolaitokseen liitetyn tankkausaseman minimikävijämääriä ja varastointikapasiteetteja, jotta kaikki tuotettu biometaani saataisiin myytyä. Keskimääräinen biometaani-autoilija on määritelty seuraavasti:

1. Käyttää biometaania 1 MWh/kk, joka vastaa noin 16 000 km vuosittaista ajoa.
2. Tankkaa yhdellä käyntikerralla keskimäärin 15kg biometaania.
3. Tankkaa kuukaudessa keskimäärin 4,85 kertaa.

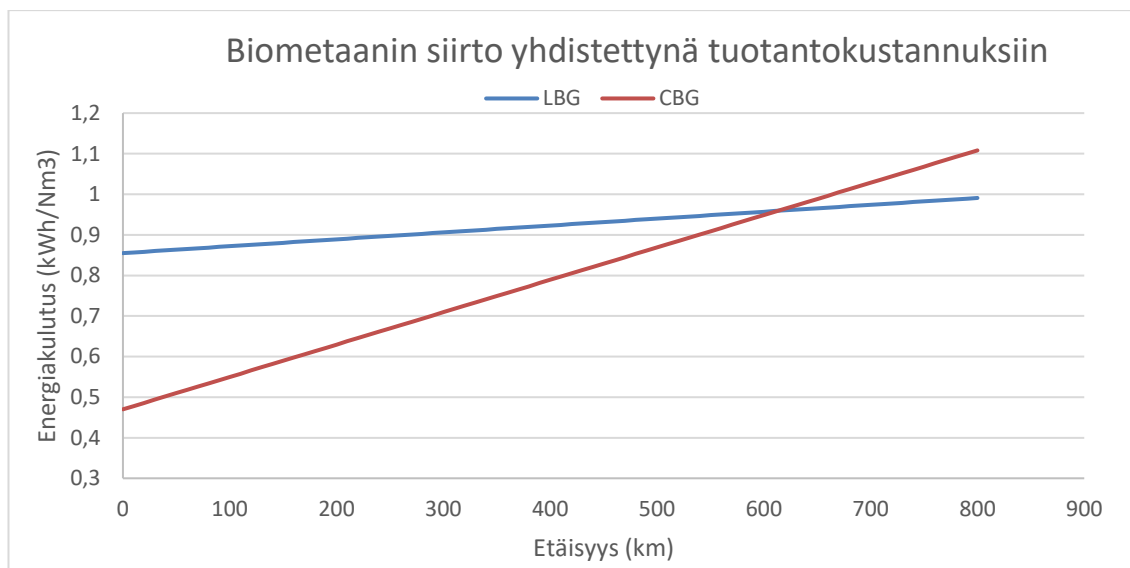
Tankkausaseman käyttöaste jakautuu päivittäin tuntitasolla eri tavalla. Koska biometaanin tuotantolaitoksen tuottama biometaanin pysyy tuntitasolla lähes vakiona, on biometaanivarastojen pystyttävä vastaamaan äkillisiin kysyntäpiikkeihin. Tankkausaseman asiakkaiden jakauma on oletettu seuraavasti: vuorokauden sisällä vilkkaita tunteja on keskimäärin 4 kpl, keskimääräisiä tunteja 8 kpl sekä hiljaisia tunteja 12 kpl. Keskimääräinen tunti on tunti, jolloin biometaanin kysyntä vastaa laitoksen tuntuotantoa, hiljainen jolloin asiakkaita käy 0-1 kpl, ja vilkkaina tunteina päivittäinen tuotantokapasiteetti myydään loppuun. Tarkasteltu biometaanin tuotantolaitos pystyy palvelemaan kuukaudessa noin 830 keskimääräistä kanta-asiakasta. Taulukossa 6.11 esitetty vilkas päivä kuvaa tarvittavaa varastokapasiteettia, kun kaikki kanta-asiakkaat käyvät asemalla saman päivän aikana.

**Taulukko 6.11** *Biometaanin tankkausaseman keskimääräiset kävijämäärät, jakauma ja tarvittava varastokapasiteetti.*

<i>Tuntijaottelu [/pv]</i>		<i>Asiakkaiden määrä [/h]</i>	<i>Varastopuskuri</i>	<i>Nm<sup>3</sup></i>
Vilkas tunti	4	33,27	1 päivä	3000
Keskimääräinen tunti	8	5,83	3 päivää	9000
Hiljainen tunti	12	1	Viikko	21000
Yhteensä	24	140	Vilkas päivä	15000

Tuotantoon tarvittava varastovolyyymi vaihtelee kävijämäärien ja tuotantoon liittyvien katkosten mukaan. Mikäli laitokselle suunnitellaan vuosittainen pidempi revisio, on mietittävä, että mistä tankkausasema saa tuolloin myytävän biometaanin. Myös päivittäiset kävijämäärät voivat vaihdella hyvin paljon, varsinkin jos biometaanin myydään kanta-asiakastyypisesti kiinteällä kuukausihinnalla. Myyntimallin etuna kuitenkin on myyntimäärien arviointi tiedetyn asiakasmäärän perusteella.

Mikäli biometaanin käyttö- ja tuotantopaikat ovat kaukana toisistaan, biometaanin nesteytys voi olla tietyissä tapauksissa kannattavaa tai ainoa vaihtoehto. Nesteytetty biometaanin voidaan siirtää suuremmassa energiatihedessä sekä suurempia määriä verrattuna kaasumaiseen varastointiin, joka parantaa siirron energiatehokkuutta. Kuvassa 6-7 on esitetty CBG:n ja LBG:n tuotannon energiatehokkuutta siirrettävän välimatkan funktiona.



**Kuva 6-7.** Biometaanin siirron ja tuotannon energiakulutus LBG:lle ja CBG:lle. Yksikkö [kWh/Nm³] biometaania. [25]

Kuvaajasta huomataan, että biometaanin nesteytys tulee kannattavammaksi, kun sen käyttöpaikka on noin 610 kilometrin päässä tuotantopaikalta. Laskentaan liittyvät kaavat ja arvot on esitelty liitteessä 11.

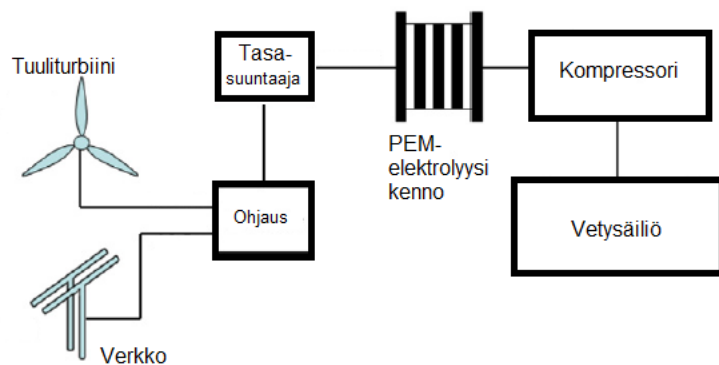
#### 6.4 Case 4 – Biometaani uusiutuvista lähteistä sekä energian varastointivälineenä

Biometaanin tuotanto synteettisesti vedystä ja hiilidioksidista mahdollistaa sähkön tuotannon ja kulutuksen eriaikaisuuden. Vedyn varastoinnin hankaluudesta johtuen syntetisointi metaaniksi on välttämätöntä. Tässä osiossa tarkastellaan konversioketjua sähköenergiasta vedyksi ja edelleen biometaaniksi. Lisäksi tarkastellaan tätä niin kutsuttua Power-to-Gas PtG-ketjua Suomen olosuhteissa, ja arvioidaan käytön kannattavuutta ja tuotetun biometaanin varteenotettavia käyttökohteita.

Tuotannon kannattavuus perustuu vedyn tuotannon energiatehokkuuteen, edulliseen sähkön tuotantohintaan sekä biometaanin kysyntään. Koska syntetisointi tarvitsee aina myös hiilidioksidia, on tuotanto järkevintä sijoittaa sellaisen käyttökohteen yhteyteen, josta sitä on saatavilla jatkuvasti ylimäärin. Tällaisia ovat esimerkiksi biokaasulaitokset, joissa biokaasu jalostetaan PSA-tekniikalla. Osion laskennassa hiilidioksidi oletetaan saatavaksi jostain tällaisesta käyttökohteesta ilman merkittäviä lisäkuluja, ja sen käsittelyyn tarvittava laitteisto sisältyy syntetisointilaitoksen investointiin. Hiilidioksidin puhdistus- ja erottelukustannus kuuluu biokaasun jalostuskustannukseen. Osiossa tarkastellaan tuuli-voimalan tuotantoa, mutta vedyn tuotannon osalta samat lainalaisuudet ja pääperiaatteet pätevät myös aurinkovoimalle. Tuotantomuotojen välillä vedyn tuotannon kannalta ero tulee tuotannon vuosittaisessa määrässä.

### 6.4.1 Vedyn tuotanto tuulivoiman avulla sekä konversio biome- taaniksi

Vedyn tuotantoa tuulisähköä elektrolysoimalla on tutkittu tutkimuksessa [16], ja erilaisia tapoja tuottaa vetyä muuttuvan tuulivoiman tuotannon mukana. Kuvassa 6-8 on esitetty tarkasteltavan uusiutuvan vedyn tuotantojärjestelmää. Tuulivoimalan koko tuotannon muuntaminen vedyksi on hankalaa johtuen elektrolyysin tasaisesta tehontarpeesta sekä tuulivoiman tuotannon jatkuvasta muuttumisesta. Helpoin ja varmatoimisin tapa tuottaa vetyä on käyttää montaa, pienitehoista elektrolyysilaitetta rinnakkain verrattuna yhteen, suurempitehoiseen elektrolyysilaitteeseen. Teoriassa koko vuosituotanto olisi mahdollista käyttää vedyn tuotantoon, mutta tämä nostaisi investointi- ja käyttöku-  
luja ja vaatisi monimutkaisemman automaatiojärjestelmän.



**Kuva 6-8.** Tuuli-elektrolyysi -prosessi. Kuva muokattu lähteestä [16].

Vedyn tuotannon hinta €/kg tuulivoimalassa vuositasolla voidaan määrittää kaavan 6.2 mukaan [16]

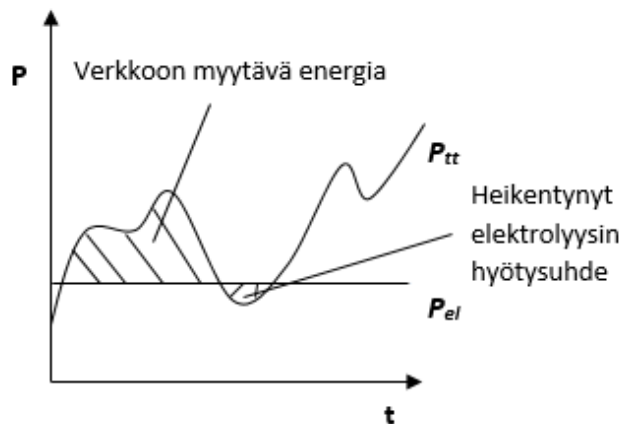
$$C_{H_2} = \frac{C_{el} + C_{sähkö} + C_{opex} - C_{myyty sähkö}}{m_{H_2}}, \quad (6.2)$$

jossa  $C_{el}$  on elektrolyysilaitteiston hinta ja  $C_{sähkö}$  on sen käyttämän sähkön hinta,  $C_{opex}$  muut muuttuvat kustannukset ja  $C_{myyty sähkö}$  verkkoon myytäväksi jäänyt sähkö. Merkittäviksi tekijöiksi tulevat tuulivoimalan investointikustannukset, tuotantopaikan tuuliolosuhteet ja niistä seuraava tuulisähkön tuotantohinta. Jotta tuulivoimala hyväksytään tuulisähkön syöttötariffijärjestelmään, sen miniminimellisteho Suomessa on 500 kVA [13].

Vedyn tuotannon osuutta tuulivoimalan kokonaistuotannosta voidaan tarkastella tarkastelemalla tuotannon suhdetta kokonaissähköntuottoon. Taulukossa 6.12 on esitetty erilaisia variaatioita tuulivedyn tuotannolle ja tuotetun vedyn hinnalle. Kaavassa (6.3) on määritetty tehojen suhde

$$x = \frac{P_{el}}{P_{tt}}, \quad (6.3)$$

jossa  $P_{el}$  elektrolysointilaitteen nimellisteho ja  $P_{tt}$  tuuliturbiinin nimellisteho. Kuva 6-9 kuvaa tuuliturbiinin tuottamaa sekä elektrolyysipiirin nimellistehoa  $P_t$ -koordinaatissa.



**Kuva 6-9.** Tuuliturbiinin teho ajan funktiona sekä elektrolysointilaitteen nimellisteho.

**Taulukko 6.12** A review on wind energy and wind-hydrogen production -tutkimuksessa saatu data eri tuotantokohteista. [16]

Kohde 1 (1, 100m)			Kohde 2 (3, 100m)			Kohde 3 (3, 100m)		
Vedyn hinta	0,49	€/kg	Vedyn hinta	6,1	€/kg	Vedyn hinta	4,43	€/kg
Kokonaistuotanto	4391,09	MWh	Kokonaistuotanto	914,7157	MWh	Kokonaistuotanto	2295,696	MWh
Sähkön tuotanto	4058,143	MWh	Sähkön tuotanto	620,075	MWh	Sähkön tuotanto	1931,328	MWh
Vedyn tuotanto	5746,29	kg	Vedyn tuotanto	5085,17	kg	Vedyn tuotanto	6288,59	kg
Nimellisteho	2300	kW	Nimellisteho	300	kW	Nimellisteho	1300	kW
Kapasiteettikerroin	0,2	-	Kapasiteettikerroin	0,24	-	Kapasiteettikerroin	0,17	-
Vedyn osuus	7,58 %	-	Vedyn osuus	32,21 %	-	Vedyn osuus	15,87 %	-
Tehosuhte	1,74 %		Tehosuhte	13,33 %		Tehosuhte	3,08 %	

Tutkimuksen [16] tuloksista huomataan, että mikäli tuotetun vedyn osuutta kokonais-tuotannosta nostetaan kasvattamalla elektrolyysipiirin ja tuuliturbiinin nimellistehon suhdetta, nousee myös tuotetun vedyn hinta. Vedyn tuotantomäärää saadaan lisättyä myös käyttämällä useampaa pienitehoista elektrolysointilaitetta verrattuna yhteen kennoon, mikäli tehojen suhde on suuri. Tutkimuksen mukaan elektrolysointilaitteen kytkentätapa ei vaikuta vedyn tuotantomäärään, kun tehosuhte pysyy välillä 3-5 %. Tutkitut tuulivoimalat olivat sisämaa-alueella, ja jonka keskimääräinen tuulennopeus 50 metrin korkeudella oli 5,08 m/s. Esimerkiksi vastaavan 2300 kW tuulivoimalan vuosituo-tanto Suomen rannikon olosuhteissa olisi noin 8-9 GWh. Tuulivoiman, kun asennettava teho on yli 200 kW, ja elektrolyysipiirin investointikustannukset ovat noin 1000 €/kW<sub>el</sub>. [16]

Tutkimuksen [16] tulosten mukaan tehosuhteella 2-3% elektrolyysikenno tuottaa noin 5000-6000 kiloa vetyä 0,50-6,1 €/kg hintaan vuodessa, riippuen tuuliolosuhteista sekä kennon kytkentätavasta. Tuotettu sähkö myydään hintaan 69 €/MWh [16]. Mikäli vastaavat tuulivoimalat siirrettäisiin Suomeen, jossa tuulisähkön takuuhinta on 83,50 €/MWh ja paremmat tuuliolosuhteet, tuotanto olisi taulukon 6.13 mukainen.

**Taulukko 6.13** Vedyn tuotanto yhdistettynä Suomalaiseen tuulivoimalaan. Elektrolysointilaitteen hyötysuhteeksi oletettu 0,67.

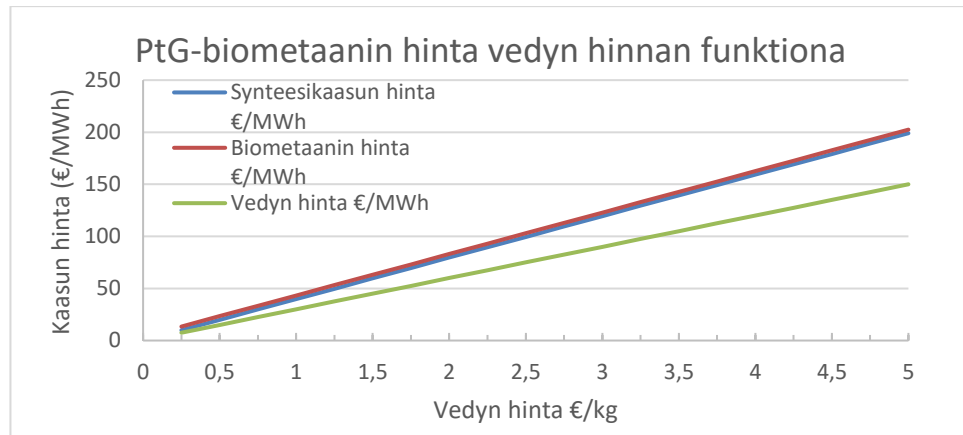
Kohde Suomessa		
Tehosuhte	1,75 %	-
Nimellisteho	3000	kW
Sähkön tuotanto	10165,944	MWh
Kokonaistuotanto	11000	MWh
Vedyn osuus	7,6 %	-
Kapasiteettikerroin	0,27	
Vedyn tuotanto	14396,39	kg
Vedyn hinta	0,58	€/kg
P(elekt.)	52,5	kW

Tuotettu vety varastoidaan tuulivoimalan yhteydessä paineistettuun vetysäiliöön. Vety voidaan käyttää paikan päällä Sabatier-reaktorissa biometaanin tuotantoon. Sabatier-prosessin hyötysuhde voidaan määrittää yhtälön (6.3) [2] mukaan

$$\eta_{Sab} = \frac{Q_{Syn}}{Q_{H_2}} = \frac{m_{Syn}LHV_{Syn}}{m_{H_2}LHV_{H_2}}, \quad (6.4)$$

jossa LHV kuvaa synteesikaasun ja vedyn alemmaa lämpöarvoa. Tutkimuksessa [2] Sabatier-hyötysuhteen optimiarvoksi on määritetty 82,5%, kun synteesikaasun metaanipitoisuus on 82%, CO<sub>2</sub>-pitoisuus 15% ja H<sub>2</sub>-pitoisuus 3%. Synteesikaasun lämpöarvo on tällöin 34 MJ/kg. Sabatier-prosessin kaavio on esitetty liitteessä 12.

Mikäli Suomalaisessa tuulivoimalassa tuotettu vety konvertoidaan biometaaniksi tutkimuksessa [2] esitetyllä prosessilla ja sen yhteyteen liitettävällä vesipesurilla, sen hinnaksi saadaan 24,53 €/MWh. Sabatier-prosessissa tuotettu synteesikaasu soveltuu hyvin vesipesurissa jatkojalostettavaksi, koska metaanilla ja vedyllä on selkeästi matalampi liukoisuus veteen kuin hiilidioksidilla, sekä jalostettavan kaasun tilavuus jää pieneksi korkean metaanin lähtöpitoisuuden vuoksi. Biometaanin jäävä vety nostaa myös sen lämpöarvoa. Prosessi soveltuu millä tahansa menetelmällä tuotetulle vedylle, ja merkittäväksi tekijäksi muodostuu tuotetun vedyn hinta. Mikäli hiilidioksidi joudutaan ostamaan, sen kustannus on lisättävä vielä hintaan. Kuvaajassa 6-10 on esitetty tuotetun biometaanin hinta vedyn hinnan funktiona käyttäen Sabatier-reaktoria sen hyötysuhteella 82,5% sekä biometaanin jalostusta vesipesulla, jonka sähkönkulutus on 0,32 kWh/Nm<sup>3</sup> synteesikaasua. Kuvaajassa myös synteesikaasun sekä vedyn hinnat muodossa €/MWh. Liitteessä 12 on esitetty laskennan tarkat arvot.



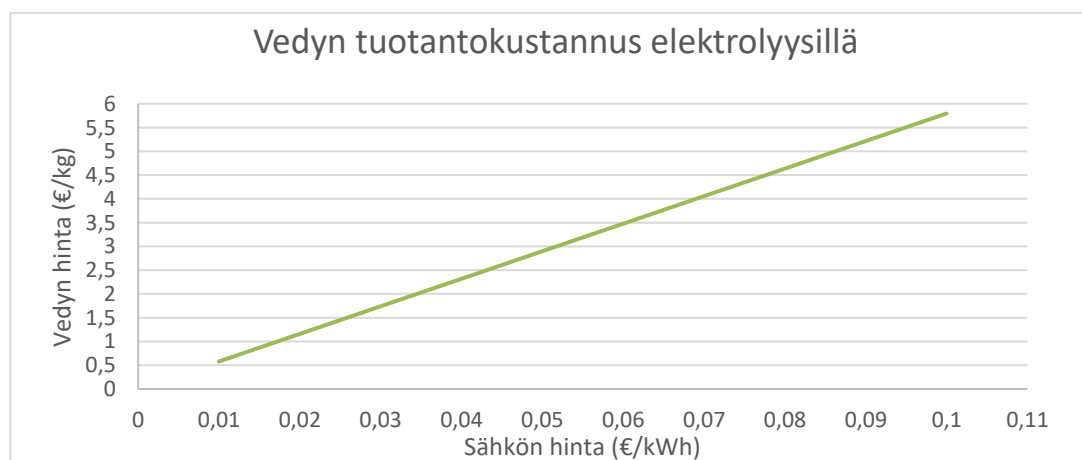
**Kuva 6-10.** Synteesikaasun ja biometaanin tuotantohinta elektrolyysi-Sabatier -prosessissa vedyn hinnan funktiona.

PtG-prosessissa tuotetun biometaanin edullisuus riippuu vahvasti vedyn tuotantomenetelmästä ja sen hinnasta. Tuulisähköllä tuotettu vety pysyy edullisena vain, kun tuuliolosuhteet ovat hyvät, sekä elektrolyysintilaitteen nimellisteho valitaan pieneksi suhteessa tuuliturbiinin nimellistehoon. Sabatier-prosessin investointikustannukset ovat pienet, joten tuotetun biometaanin hinta on lähes täysin riippuvainen muuttuvista kustannuksista.

PtG-prosessin kokonaishyötysuhde sähköstä synteesikaasuksi voidaan määrittää

$$\eta_{PtG} = \frac{Q_{Syn}}{P_{sähkö} + P_{prosessi} + \Delta Q_{prosessi}} \quad (6.5)$$

ja sen arvo on välillä 0,7-0,75 [2,18]. Tarkasteltaessa täyttä konversioketjua sähköstä tuotetun synteesikaasun jatkokäyttöön, on huomioitava myös loppukäytön kokonaishyötysuhde ja sen jakauma sähkön- ja lämmöntuoton suhteen. Tuotetun vedyn hinta elektrolyysintilaitteella käytetyn sähkön hinnan funktiona esitetään kuvaajassa 6-11. Kuvaajasta voidaan lukea tuotetun vedyn hinta, kun käytetyn sähkön tuotantohinta tiedetään.



**Kuva 6-11.** Elektrolyysillä tuotetun vedyn hinta sähkön hinnan funktiona. Elektrolyysintilaitteen hyötysuhde 0,68 HHV/ $E_s$ .



### 6.4.2 Biometaani ja PtG-sovellus

Mikäli PtG-järjestelmää halutaan käyttää edullisen sähkön hinnan aikana energian varastointiin, tulee järjestelmän olla energiatehokas ja pystyä hyödyntämään synteetikaasun poltossa syntyvä lämpö. Mikäli kaukolämmön hinnaksi määritetään 60 €/MWh, sähkön hinnan on noustava vedyn tuotantohetken ja synteetikaasun käytön välillä 3-4-kertaiseksi pelkkien muuttuvien kustannusten ja tuotantohäviöiden kattamiseen. Menetelmä voisi täten sopia vain sellaisen toiminnan lisäksi, jossa metaanipolttoaineelle sopivaa tuotantoa on jo valmiiksi, jolloin PtG-toiminta ei aiheuta lisäkuluja muutoin kuin elektrolysointilaitteen ja Sabatier-reaktorin investoinnin kautta. Prosessin kannattavuutta voidaan kehittää parantamalla elektrolyysin energiatehokkuutta, toisin sanoen tuotetun vetykilon tarvitsemaa sähköenergiämäärää pienentäen, sekä Sabatier-reaktorin hyötysuhdetta ja eksotermisen metanointiprosessin hukkalämmön talteenottoa nostamalla. Taulukossa 6.14 kuvataan 1 MWh sähköenergian konversiota synteetikaasuksi ja sähkön hinnan tarvitsemaa nousukerrointa  $n$ , jotta päästään  $\pm 0$  -tulokseen.

**Taulukko 6.14** Tarvittava sähkön hinnan kasvukerroin PtG-sovelluksessa eri tuotantomenetelmillä, kun lämmön hinta 60€/MWh, per 1 MWh sähköenergiaa.

<i>Syngas 0,4745 MWh</i>	<i>Tuotettu sähkö</i>	<i>Tuotettu lämpö</i>	<i>Häviöt</i>	<i>n</i>
<i>SOFC</i>	0,261	0,157	12%	3,4
<i>CHP-moottori</i>	0,214	0,214	10%	3,96
<i>Kombivoimalaitos</i>	0,285	0,166	5%	3,09

## 7. YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin biokaasun ja biometaanin tuotantomenetelmiä sekä niiden käytettävyyttä ja toteutettavuutta Suomen olosuhteissa. Biokaasun tuotantoa tarkasteltiin ennen kaikkea Suomen tärkeimmän energiakasvin, nurmen, kannalta sekä sen jatkojalostukseen biometaaniksi vaikuttavia suureita ja menetelmiä. Synteettisen biokaasun tuotantomahdollisuuksia tarkasteltiin puubiomassan sekä mustalipeän kaasutuksen ja biometaaniksi jalostuksen kannalta. Työssä tarkasteltiin myös biometaanin tuotantoa Sabatier-reaktorin avulla uusiutuvista energialähteistä sekä Power-to-Gas -prosessin kannattavuutta Suomen olosuhteissa. Biometaanin käyttökohteita arvioitiin niiden taloudellisen kannattavuuden ja ympäristönäkökulman kannalta sekä biometaanin tuottajan, että käyttäjän näkökulmasta.

Tuloksista huomataan, että Suomessa biokaasun tuotannolla voidaan kattaa merkittävä osa täällä käytetystä maakaasusta tai liikennepolttoaineesta. Peltobiomassoilla voidaan tuottaa biometaania noin 7-8 TWh, puubiomassalla noin 8 TWh sekä selluntuotantoon liitettyllä mustalipeän kaasutuksella noin 6 TWh. Yhteenlaskettu tuotantopotentiaali Suomessa on noin 22 TWh, joka kattaisi noin 88% käytetystä maakaasusta tai 46% käytetystä liikennebensiinistä ja dieselistä vuoden 2016 tasoon nähden.

Anaerobiseen hajoamiseen perustuvassa biokaasun ja biometaanin tuotannossa Suomen oloissa reaktorisuunnittelulla on oleellinen vaikutus tuotannon kannattavuuteen. Tuotanto pitää pystyä toteuttamaan mahdollisimman energiatehokkaasti, jotta prosessin tarvitseman energian osuus ei nouse liian korkeaksi. Prosessin kokonaishyötysuhde on myös vaikuttava tekijä kaupallisuudelle, ja se voi olla ratkaisevaa kannattavan ja tappiollisen liiketoiminnan välillä. Myös reaktorissa käytetyn syötteen hinta on merkittävä osa kaupallistumista. Kaupallisesti tuotanto on kannattavinta myydä biometaanina, jolloin tuotteesta saadaan paras mahdollinen hinta. Myös kansantaloudellisesti Suomen hiilijalanjälkeä tarkasteltaessa biometaanin käyttö liikennepolttoaineena on paras vaihtoehto, koska silloin se korvaa muutoin hankalasti korvattavaa fossiilista polttoainetta. Sähkön ja lämmön tuotanto voidaan korvata helpommin sekä taloudellisesti kannattavammin uusiutuvilla lähteillä kuin liikennepolttoaineet. Omavaraiseen energiantuotantoon pyrkiessä biokaasun tuotanto on kilpailukykyinen fossiilisen öljyn kanssa, mikäli laitoksen tarvitsema syöte saadaan hankittua ilmaiseksi. Myös liikennebiometaanin tuotanto on taloudellisesti kannattavaa tällöin.

Synteettisen biometaanin tuotantoa tarkastelussa huomattiin, että puubiomassan kaasutukseen perustuva synteesikaasun tuotanto ja sen jalostus biometaaniksi ei vielä ole kilpailukykyistä verrattuna maakaasun hintaan. Suomessa on kuitenkin huomattavaa potentiaalia tuotannolle sekä soveltuva infrastruktuuri. Tuotannon volyymi ja sen tarvitsemat investoinnit ovat niin suuria, että biometaanille on ensin saatava tarpeeksi suuri kysyntä,

ennen kuin investointi on ajankohtainen. Laitoksen sijoituspaikka tulisi myös tarkastella tarkkaan, koska laitokselle on oltava hyvät kulkuyhteydet sekä tuotanto pitäisi pystyä liittämään suoraan maakaasuverkkoon. Valtiollisilla investointi- tai tuotantotukipaketeilla tuotanto olisi mahdollista saada kannattavaksi, sekä tuotannon avulla saataisiin tehtyä merkittäviä leikkauksia vuotuisiin CO<sub>2</sub>-päästöihin. Nykyisillä maakaasun sekä energia-puun hinnoilla paras tuen muoto olisi tuotantoon perustuva tuki, koska energiapuun hinta on noin kaksi kolmasosaa biometaanin energiayksikkökohtaisesta tuotantohinnasta.

Edullisimmaksi tavaksi tuottaa biometaania havaittiin mustalipeän kaasutukseen perustuva prosessi. Työssä ei määritetty mustalipeälle rahallista arvoa, koska sitä syntyy sellun keitossa ylimäärin. Tällöin biometaanin tuotantokustannus koostuu vain prosessilaitteiston investointi- ja käyttökustannuksista sekä kaasuttimen hankinnasta. Prosessi on kaasutinta ja raaka-ainetta lukuun ottamatta identtinen puubiomassan kaasutuksen ja metanoinnin kanssa. Menetelmän haasteena on vielä luoda kestävä, korkean vuotuisen käyttöajan omaava kaasutinrakenne, koska kaasuttimen sisällä muodostuva sula tuhka on liian korrosoiva. Menetelmä ei aiheuta ongelmia tai muutoksia sellun keittoprosessiin.

Biometaanin varastointiin liittyvien teknologioiden vertailussa huomattiin, että varastointi paineistettuna CBG-tekniikalla on vielä Suomessa kannattavin vaihtoehto. Varastointi kiinteään väliaineeseen adsorptoituna on lupaava, kehitystyön alainen tekniikka, jonka avulla voidaan luoda noin 33% säästö paineistusenergian käytössä. Teknologia mahdollistaa myös fyysisesti erilaisten säiliömallien suunnittelun, jolla voi olla merkittäviä sovelluksia ajoneuvojen suunnittelussa. Biometaanin nesteytys on taloudellisesti kannattavaa vain, kun biometaanin tuotanto- ja käyttöpaikan välinen ero on yli 610 kilometriä.

Biometaanin käyttöä energian varastointivälineenä sekä synteettisen biometaanin tuotantoa vedyn ja hiilidioksidin avulla Sabatier-reaktorissa tarkasteltiin Suomen olosuhteissa. Tuloksista huomattiin, että vedyn tuotanto uusiutuvista energialähteistä on kannattavaa vain pienessä mittakaavassa. Tuulivoiman tapauksessa elektrolyysipiirin nimellistehon ollessa noin 2% tuuliturbiinin nimellistehosta päästään edulliseen tuotetun vedyn kilohintaan. Vuosituotannosta ei ole kuitenkaan mahdollista hyödyntää kuin noin 7-8% vedyn tuotantoon. Ostetulla sähköllä elektrolyysipiirissä käytetty sähkö tulee saada edullisesti, noin 20-30 €/MWh, jotta tuotetun biometaanin hinta pysyy kilpailukykyisenä verrattuna muihin biometaanin tuotantomenetelmiin. PtG-sovelluksessa sähkön hinnan tulee nousta noin 3-4 kertaiseksi konversion välillä, jotta kaupallisessa CHP-tuotannossa myynti saadaan tuotantokustannusten tasolle.

Biometaanin tuotantohinta eri raaka-aineista on esitetty taulukossa 7.1. Anaerobiseen hajoamiseen perustuva tuotantohinta sisältää paineistuskustannuksen CBG-käyttöön 200 bar paineeseen, synteettisen biometaanin tuotantohinnat ovat prosessin loppuvaiheen paineessa 30 bar. Maakaasun hinta Suomessa keväällä 2017 on 27,50-32,50 €/MWh [15].

**Taulukko 7.1.** Työssä selvitetty biometaanin tuotantohinnat eri tuotantomenetelmillä. Maakaasun hinta 27,50-32,50 €/MWh [15]. Elektrolyysillä tuotetun biometaanin hinta sähkön hinnoilla 20-30 €/MWh, energiapuu 25 €/MWh, mustalipeä 0€.

[€/MWh]	<i>Nurmi</i>	<i>Energiapuu</i>	<i>Mustalipeä</i>	<i>Elektrolyysi</i>
<i>CHP + Biometaani</i>	71,63 - 83,75	-	-	-
<i>Biometaani</i>	57,60 - 106,05	49,04 - 57,78	12,40 - 15,99	73,0-93,0

Taulukossa 7.1 esitetyt arvot on laskettu luvussa 6 sekä liitteissä 9-12. Nurmella tuotetun biometaanin halvempi, 57,60 €/MWh hinta saatiin prosessimallilla, jossa tuotantolaitoksen prosessienergian tarve on olematon ja suurin hinta silloin, kun laitos käyttää biokaasulaitoksen omaa biokaasua prosessienergian kattamiseen kokonaishyötysuhteella 0,6. Tuloksista huomataan, että biometaani on myytävä liikennepolttoaineena, erillään maakaasusta, jotta kaupallinen tuotanto on kannattavaa. Energiapuun kaasutukseen perustuva biometaanin tuotantohinta on laskettu energiapuun hinnalla 25 €/MWh kahdella prosessilla, joista yksinkertaisemmalla saatiin halvempi hinta, 49,04 €/MWh. Kaasutuksella tuotetun biometaanin tuotantohinta saataisiin energiayksikköpohjaisella tuotantotuella 25,00 €/MWh kilpailukykyiseksi maakaasun kanssa. Maakaasun hinnassa perittävä tuotantotuki nostaisi maakaasun hintaa noin 0,90 €/MWh.

Mustalipeän kaasutukseen perustuva tuotantohinta on laskettu käyttäen samaa prosessia, kuin energiapuun kaasutukseen perustuva. Tällöin vuotuinen käyttöaika on 20% pienempi, joka johtaa pääomakustannusten kasvuun. Vedyn tuotanto elektrolyysillä ja sen jatkokäsittely biometaaniksi riippuu erittäin vahvasti käytetyn sähkön hinnasta. Taulukoon 7.1 on kerätty hinta sähkön hinnalla 20-30 €/MWh, koska tämä sähkön tuotantohinta on mahdollista saavuttaa Suomessa. Sabatier-reaktorin tarvitsema hiilidioksidi oletetaan saatavaksi ilmaiseksi, ja sen hinta on huomioitava, mikäli hiilidioksidi joudutaan ostamaan ulkopuoliselta toimijalta.

## LÄHTEET

- [1] M. Airila, Paineilman kehittäminen teollisuudessa, Konepajamies N: o 6, 1976.
- [2] M. A. Ancona, G. Antonioni, L. Branchini, A. De Pascale, F. Melino, V. Orlan-  
dini, V. Antonucci, M. Ferraro, Renewable energy storage system based on a  
Power-to-Gas conversion process, *Energy Procedia* 101, 2016.
- [3] O. W. Awe, Y. Zhao, A. Nzihou, D. P. Minh, N. Lyczko, A Review of Biogas  
Utilisation, Purification and Upgrading Technologies, *Waste Biomass Valor*,  
Springer Science+Business Media Dordrecht, 2017.
- [4] A. Babae, J. Shayegan, Effect of organic loading rates (OLR) on production of  
methane from anaerobic digestion of vegetables waste, *World Renewable Energy  
Congress 2011 Sweden*, 2011.
- [5] E. Billig, D. Thrän, *Energy: Evaluation of biomethane technologies in Europe –  
Technical concepts under the scope of a Delphi-Survey embedded in a multi-cri-  
teria analysis*, Elsevier Ltd, 2016.
- [6] W.M. Budzianowski, C.E. Wylock, P.A. Marciniak, Power requirements of bio-  
gas upgrading by water scrubbing and biomethane compression: comparative  
analysis of various plant configurations, Elsevier Ltd, 2016.
- [7] Y.A. Cengel, M.A. Boles, *Thermodynamics – An engineering approach*,  
McGraw-Hill Companies Inc, 2011.
- [8] R. Chein, C-T. Yu, C-C. Wang, Numerical simulation on the effect of operating  
conditions and syngas compositions for synthetic natural gas production via  
methanation reaction, Elsevier Ltd, 2016.
- [9] P. Collet, E. Flottes, A. Favre, L. Raynal, H. Pierre, S. Capela, C. Peregrina,  
Techno-economic and Life Cycle Assessment of methane production via biogas  
upgrading and power to gas technology, Elsevier Ltd, 2016.
- [10] L. Devi, K. J. Ptasinski, F. J.J.G. Janssen, A review of the primary measures for  
tar elimination in biomass gasification processes, *Environmental Technology  
Group*, Eindhoven University of Technology, 2002.
- [11] Energiavirasto, sähkön hintatilastot 2017, 2017. Saatavilla: <https://www.energiavirasto.fi/sahkon-hintatilastot>
- [12] M. Feroldi, A.C. Neves, V.R. Bach, H.J. Alves, Adsorption technology for the  
storage of natural gas and biomethane from biogas, *Wiley Online Library*, 2016.

- [13] Finlex, Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta. 2017. Saatavilla: <http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2010/20101396>
- [14] H. Furukawa, O.M. Yaghi, Storage of Hydrogen, Methane and Carbon Dioxide in Highly Porous Covalent Organic Frameworks for Clean Energy Applications, Department of Chemistry and Biochemistry, University of California, 2009.
- [15] Gasum Oy, Maakaasun hinnan muodostuminen & Suomen kaasuverkosto, www-sivu. 2017. Saatavilla: <https://www.gasum.com/kaasusta>. Viitattu 11.5.2017.
- [16] M. S. Genc, M. Celik, I. Karasu, A review on wind energy and wind-hydrogen production in Turkey: A case study of hydrogen production via electrolysis system supplied by wind energy conversion system in Central Anatolian Turkey, Elsevier Ltd, 2012.
- [17] A. Gomez-Barea, B. Leckner, Modeling of biomass gasification in fluidized bed, Elsevier Ltd, 2010.
- [18] M. Götz, J. Lefebvre, F. Mörs, A.M. Koch, F. Graf, S. Bajohr, R. Reimert, T. Kolb, Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review, Elsevier Ltd, 2015.
- [19] P. Haro, F. Johnsson, H. Thunman, Improved syngas processing for enhanced Bio-SNG production: A techno-economic assessment, Elsevier Ltd, 2016.
- [20] M. Hedenskog, The GoBiGas-project – Gasification to produce high-quality biogas, Göteborg Energi AB, 2014. Saatavilla: [http://www.vtt.fi/files/projects/ve-taani/malin\\_hedenskog.pdf](http://www.vtt.fi/files/projects/ve-taani/malin_hedenskog.pdf)
- [21] C. Higman, M. van der Burgt, Gasification, Gulf Professional Publishing, 2011.
- [22] H-J. Huang, S. Ramaswamy, Thermodynamical analysis of black liquor steam gasification, BioResources 6(3), s. 3210-3230, 2011.
- [23] M. Huttunen, V. Kuittinen, Suomen biokaasulaitosrekisteri n:o 19 – Tiedot vuodelta 2015, Publications of the University of Eastern Finland, 2016. Saatavissa: [http://epublications.uef.fi/pub/urn\\_isbn\\_978-952-61-2161-1/urn\\_isbn\\_978-952-61-2161-1.pdf](http://epublications.uef.fi/pub/urn_isbn_978-952-61-2161-1/urn_isbn_978-952-61-2161-1.pdf)
- [24] O. Hyvärinen, J. Kelavuori, E. Virkkunen. Matkaraportti – Biokaasumatka Haminaan ja Laukaaseen, Luonnonvarakeskus, 2016. Saatavilla: [http://www.vuo-gas.fi/wp-content/uploads/2016/08/Matkaraportti\\_Hamina\\_Laukaa.pdf](http://www.vuo-gas.fi/wp-content/uploads/2016/08/Matkaraportti_Hamina_Laukaa.pdf)

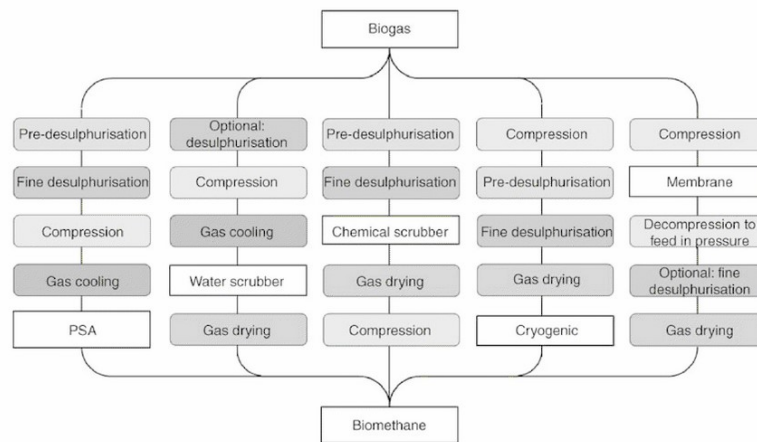
- [25] N. Johansson, Production of liquid biogas, LBG, with cryogenic and conventional upgrading technology – Description of systems and evaluations of energy balances, Master's thesis, Lund University of Technology, 2008.
- [26] J. Kalmari-Harju, Metener Oy, Kuivareaktori, 2015. Saatavilla: [https://asia-kas.kotisivukone.com/files/metenerii.yrittaa.fi/Kuivareaktori\\_uutuser-vot\\_6.10..pdf](https://asia-kas.kotisivukone.com/files/metenerii.yrittaa.fi/Kuivareaktori_uutuser-vot_6.10..pdf)
- [27] E. Kurkela, P. Simell, P. McKeough, M. Kurkela. Synteesikaasun ja puhtaan polttokaasun valmistus. VTT Technical Research Centre of Finland, 2008.
- [28] M. Kymäläinen, O. Pakarinen, Biokaasuteknologia – Raaka-aineet, prosessointi ja lopputuotteiden hyödyntäminen, Suomen Biokaasuyhdistys ry, 2015. Saatavissa: <http://www.hamk.fi/biokaasuteknologia>
- [29] Lahti Energia, Energian hankinta ja tuotanto, 2017. Saatavilla: <https://www.lah-tienergia.fi/lahti-energia/energian-tuotanto>
- [30] A. Lampinen, Liikennebiokaasun käyttöönotto Suomessa, Tekniikan Waiheita 1/2012, s. 5-20, Tekniikan historian seura, 2012.
- [31] M. Latvala, Paras käytettävissä oleva tekniikka (BAT) – Biokaasun tuotanto suomalaisessa toimintaympäristössä, Suomen Ympäristö 24/2009, Suomen ympäristökeskus, 2009.
- [32] Luonnonvarakeskus Luke, Energiapuun kauppa, vuositilastot, www-sivu. 2017. Saatavilla: [http://stat.luke.fi/energiapuun-kauppa-1-vuosinelj%C3%A4nnes-2015\\_fi](http://stat.luke.fi/energiapuun-kauppa-1-vuosinelj%C3%A4nnes-2015_fi). Viitattu 11.5.2017.
- [33] Luonnonvarakeskus, Sotkamon toimipiste. VuoGas-hanke. 2016.
- [34] A.S. Mehr, M. Gandiglio, M. MosayebNezhad, A. Lanzini, S.M.S Mahmoudi, M. Yari, M. Santarelli, Solar-assisted integrated biogas solid oxide fuel cell (SOFC) installation in wastewater treatment plant: Energy and economic analysis, Elsevier Ltd, 2017.
- [35] Metsä Fibre Oy, Joutsenon sellutehdas, www-sivu. 2017. Saatavilla: <http://www.metsafibre.com/fi/yhtio/Pages/Joutseno.aspx>. Viitattu 11.5.2017.
- [36] Metsäteollisuus ry, Suomen metsävarat kasvavat jatkuvasti, www-sivu. 2017. Saatavilla: <https://www.metsateollisuus.fi/painopisteet/metsat-puuhuolto/met-sien-vastuullinen-kaytto/Suomen-metsavarat-kasvavat-jatkuvasti-73.html>
- [37] B.F. Möller, Gasification development at E. ON, Gasification Development AB, 2012.

- [38] B.F. Möller, Status of Bio2G and Gasification testing at GTI, SGC International Seminar on Gasification, 2014. Saatavilla: [http://conference.sgc.se/ckfinder/user-files/files/2\\_3\\_%20Bjorn%20Fredriksson%20Moller.pdf](http://conference.sgc.se/ckfinder/user-files/files/2_3_%20Bjorn%20Fredriksson%20Moller.pdf)
- [39] M. Naqvi, J. Yan, E. Dahlquist, Black liquor gasification in pulp and paper mills: A critical review, Elsevier Ltd, 2010.
- [40] M. Naqvi, J. Yan, M. Fröling, Bio-refinery system of DME or CH<sub>4</sub> production from black liquor gasification in pulp mills, Elsevier Ltd, 2009.
- [41] D.D. Papadimas, S. Ahmed, R. Kumar, Fuel quality issues with biogas energy – An economic analysis for a stationary fuel cell system, Elsevier Ltd, 2012.
- [42] M. Persson, O. Jönsson, A. Wellinger, Biogas upgrading to Vehicle Fuel Standards and Grid Injection, IEA Bioenergy, 2006. Saatavilla: [http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/upgrading\\_report\\_final.pdf](http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/upgrading_report_final.pdf)
- [43] P. Potocnik, Natural Gas, Sciyo, 2010. Saatavilla: <https://www.intechopen.com/books/natural-gas>
- [44] R. Raiko, Voimalaitostekniikka, Tampereen teknillinen yliopisto, 2011.
- [45] P. Rotunno, A. Lanzini, P. Leone, Energy and economic analysis of a water scrubbing based biogas upgrading process for biomethane injection into the gas grid or use as transportation fuel, Elsevier Ltd, 2016.
- [46] S. Rönsch, J. Schneider, S. Matthischke, M. Schlüter, M. Götz, J. Lefebvre, P. Prabhakaran, S. Bajohr, Review on methanation – from fundamentals to current projects, Elsevier Ltd, 2015.
- [47] A. Seppälä, P. Kässi, H. Lehtonen, E. Aro-Heinilä, Oiva Niemeläinen, E. Lehtonen, J. Höhn, T. Salo, M. Keskitalo, M. Nysand, E. Winquist, S. Luostarinen, T. Paavola, Nurmesta biokaasua liikennepolttoaineeksi, MTT Raportti 151, 2014. Saatavilla: <http://www.mtt.fi/mttraportti/pdf/mttraportti151.pdf>
- [48] Suomen Kaasuyhdistys, Kaasutilastot - Maa- ja biokaasu Suomessa ja maailmalla, 2016. Saatavilla: <http://www.kaasuyhdistys.fi/sisalto/kaasutilastot>
- [49] Suomen Tuuliatlas, Tuulisuus Suomessa, www-sivu. Saatavilla: <http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/>. Viitattu 5.5.2017.
- [50] Suomen Tuulivoimayhdistys ry, Tuulivoima Suomessa, www-sivu. Saatavilla: <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-suomessa>. Viitattu 5.5.2017.

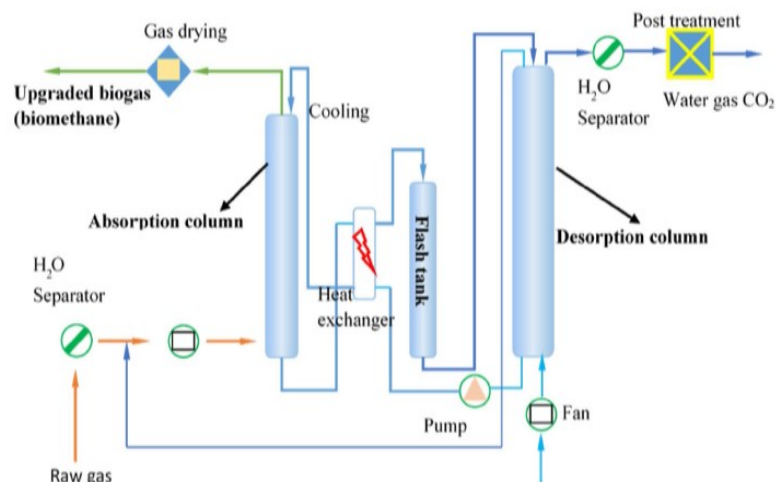


- [51] D. Topic, D. Sljivac, L. Jozsa, S. Nikolovski, M. Vukobratovic, J.J. Strossmayer, Cost-benefit analysis of biogas CHP (Combined Heat and Power) Plant, University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, 2007. Saatavilla: [http://www.academia.edu/8357521/Cost-benefit\\_Analysis\\_of\\_Biogas\\_CHP\\_Plant](http://www.academia.edu/8357521/Cost-benefit_Analysis_of_Biogas_CHP_Plant)
- [52] P. Torri, Biokaasu – puhdas liikenteen polttoaine, missä menet biokaasu –seminaari, Gasum Oy, 2012. Saatavilla: [http://www.biokaasuyhdistys.net/docs/semin2012/Pasi\\_Torri.PDF](http://www.biokaasuyhdistys.net/docs/semin2012/Pasi_Torri.PDF)
- [53] Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi, Ajokannan käyttövoimia – Liikennekäytössä olevat ajoneuvot käyttövoimittain, www-sivu. Saatavilla: [https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan\\_kayttovoimatilastot](https://www.trafi.fi/tietopalvelut/tilastot/tieliikenne/ajoneuvokanta/ajoneuvokannan_kayttovoimatilastot)
- [54] Turveruukki Oy, Bioenergiaporssi.fi, Puu polttoaineena -taulukot. Saatavilla: <http://www.bioenergiaporssi.fi/k%C3%A4sitteet-ja-laskurit/puu-polttoaineena>
- [55] V. Uusitalo, J. Havukainen, R. Soukka, S. Väisänen, M. Havukainen, M. Luorinen, Systematic approach for recognizing limiting factors for growth of bio-methane use in transportation sector – A case study in Finland, Lappeenranta University of Technology. Elsevier Ltd, 2015.
- [56] A. Wellinger, J. Murphy, D. Baxter, The biogas handbook. Science, production and applications. IEA Bioenergy. Woodhead Publishing Ltd, 2013.
- [57] B. Wischnewski, Peace Software, WWW-sivu. Metaanin termodynaamisten muuttujien laskuri. Saatavilla: [http://www.peacesoftware.de/einigewerte/methan\\_e.html](http://www.peacesoftware.de/einigewerte/methan_e.html)
- [58] Li, Y. & Park, Y. S. & Zhu J, Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste, Renewable and Sustainable Energy Reviews, volume 15. s. 821 – 826. Elsevier. 2011.
- [59] Yle uutiset, Kimmo Tiilikaisen kommentit. WWW-sivu. Saatavilla: <http://yle.fi/uutiset/3-9468529>
- [60] R.W.R. Zwart, H. Boerrigter, E.P. Deurwaarder, C.M. van der Meijden, S.V.B. van Paasen, Production of Synthetic Natural Gas (SNG) from Biomass, Energy research Centre of the Netherlands, 2006. Saatavilla: <https://www.ecn.nl/docs/library/report/2006/e06018.pdf>
- [61] Öljytuotteiden myynti Suomessa vuonna 2016, Öljy- ja biopolttoaine ry, 2017. Saatavissa: [http://www.oil.fi/sites/default/files/sivut/sisaltosivu/liitetiedostot/3.4\\_myynti\\_0.pdf](http://www.oil.fi/sites/default/files/sivut/sisaltosivu/liitetiedostot/3.4_myynti_0.pdf)

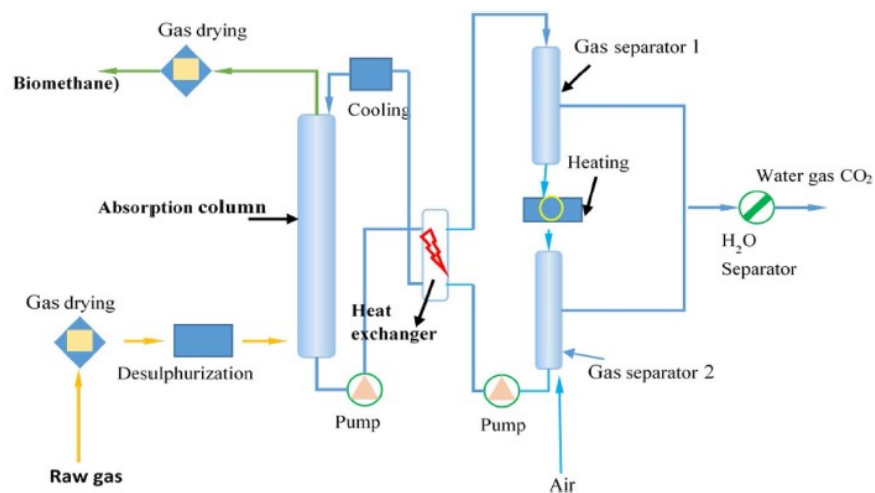
## LIITE 1: Biokaasun puhdistukseen ja jalostukseen käytetyt kaupalliset menetelmät



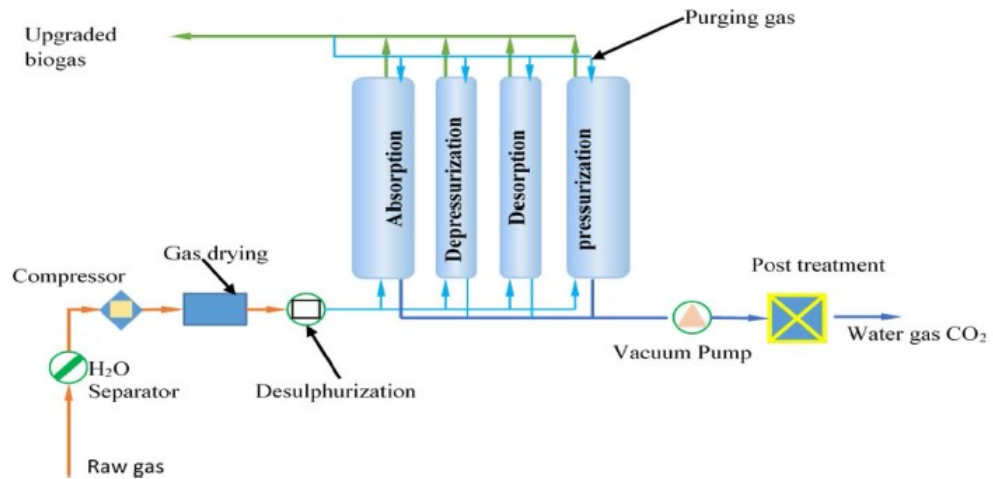
**Kuva 1.1.** Biokaasun puhdistus- ja jalostusteknologiat. [14 s. 339]



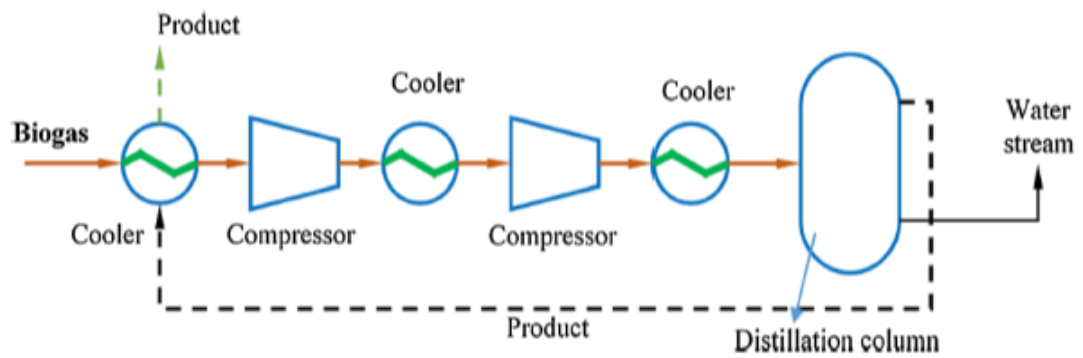
**Kuva 1.1.** Biokaasun vesipesuri (absorptio veteen). [3]



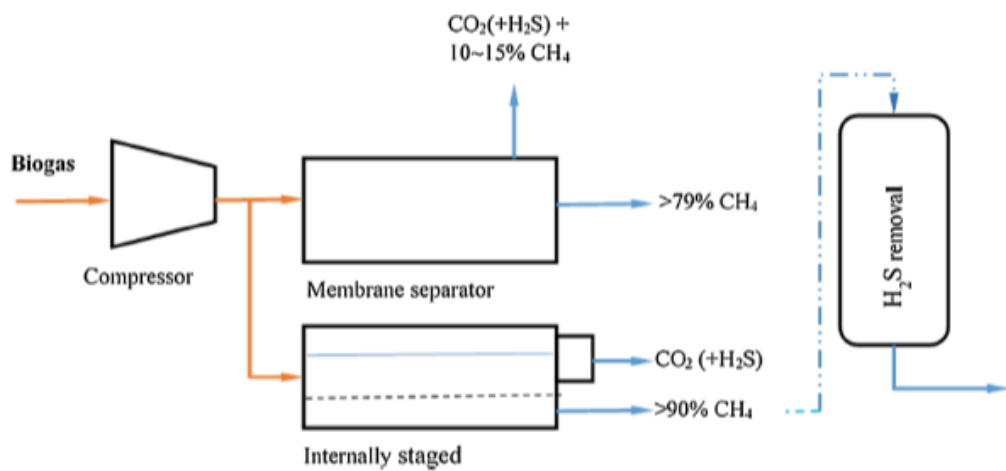
**Kuva 1.3.** Biokaasun amiinipesuri (absorptio amiiniin). [3]



**Kuva 1.4.** Biokaasun PSA-jalostusyksikkö (adsorptio). [3]

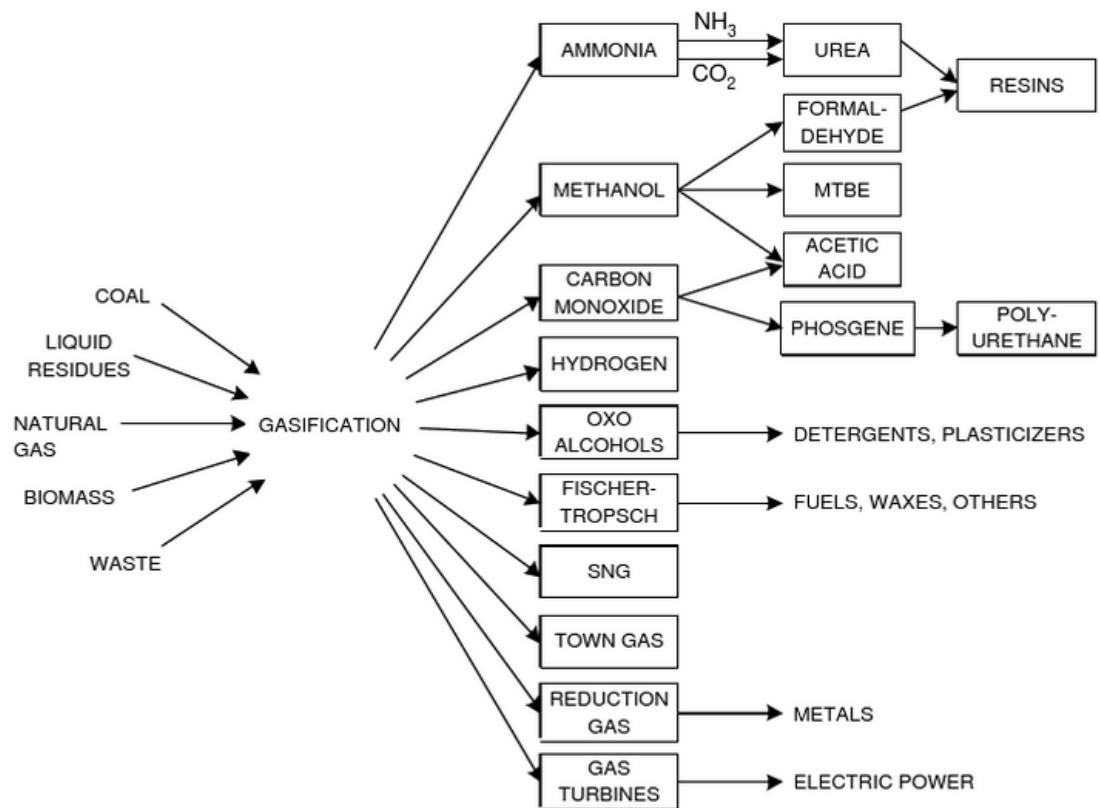


**Kuva 1.5.** Biokaasun kryojalostus (nesteytys). [3]



**Kuva 1.6.** Biokaasun kalvojalostus. [3]

## LIITE 2. Kaasutusprosessien raaka-aineet sekä siitä saatavat lopputuotteet



Lähde: C. Higman, M. van der Burgt, Gasification, Gulf Professional Publishing, 2011. Sivu 257.

### LIITE 3. VTT:n tekemä tutkimus synteesikaasun koostumuksesta eri olosuhteissa mäntypurun leijukerrokskaasutuksessa.

IDFB-koeajo – pvm	19.8.2004	2.9.2004	3.9.2004	13.10.2004	24.9.2004	25.1.2005	26.1.2005	20.8.2004	24.8.2004	25.8.2004
Koetyyppi	ilma- kaasutus	ilma- kaasutus	ilma- kaasutus	ilma- kaasutus	höyry/ilma- kaasutus	höyry/O <sub>2</sub> - kaasutus	höyry/O <sub>2</sub> - kaasutus	höyry- kaasutus	höyry- kaasutus	höyry- kaasutus
Polttoaine	mäntypuru	mäntypuru	mäntypuru	mäntypuru	mäntypuru	mäntypuru	mäntypuru	mäntypuru	mäntypuru	mäntypuru
Petimateriaali	hiekkä	hiekkä	hiekkä	hiekkä+ kalkki	hiekkä	hiekkä	hiekkä	hiekkä	hiekkä	hiekkä
T(peti/yläosa), °C	826/834	823/835	824/831	827/835	812/831	829/840	831/841	817/831	788/829	816/834
Polttoaineen syöttö, mg/s	196	223	144	280	264	345	295	277	555	181
Höyryn syöttö, kg/kg-daf polttoainetta	0,59	0	0,40	0	0,76	0,55	0,65	0,76	0,39	1,10
O <sub>2</sub> -syöttö, % stoikiometrisen palamisen hapen tarpeesta	14	24,5	28,8	20	4,4	14	17	0	0	0
Leijutusnopeus <sup>1</sup> , m/s	1,26	1,20	1,22	1,21	1,37	1,22	1,25	1,44	1,43	1,37
Kaasun viipymäaika <sup>2</sup> , s	6,12	6,6	7,5	5,7	5,3	5,5	5,8	4,98	3,8	6,3
Pedin paine-ero, mbar	5,9	5,7	8,7	15	12,2	11,6	21	13,3	13,4	10,8
Kuivan tuotekaasun koostumus <sup>3</sup> , til%										
CO	26,2	20,2	18,2	22,0	23,6	40,7	39,2	34,8	40,9	29,7
CO <sub>2</sub>	13,9	14,2	14,6	14,4	19,4	20,5	23,3	16,0	12,2	18,5
H <sub>2</sub>	14,5	7,4	7,5	15,9	33,2	22,1	21,7	34,0	29,4	37,1
N <sub>2</sub> (+Ar)	34,7	50,4	53,2	40,1	11,8	0,08	0,08	0,07	0,08	0,07
CH <sub>4</sub>	7,3	5,3	4,4	5,4	8,7	11,6	11,2	10,7	12,2	10,5
C <sub>2</sub> Hy	3,36	2,5	2,1	2,1	3,3	4,9	4,5	4,4	5,1	4,1
C <sub>3</sub> -C <sub>5</sub> Hy	0,06	0,05	0,03	0,01	0,04	0,1	0,09	0,08	0,13	0,05
Bentseenin muodostus, g/kg PA-daf	29,0	26,2	24,2	21,3	26,0	31,2	26,1	28,4	29,0	26,8
Tervan muodostus, g/kg PA daf	30,4	32,3	21,8	19,5	27,2	40,2	31,3	25,7	32,0	23,6
C-konversio <sup>4</sup> , m-%	100,0	99,9	99,7	97,6	96,5	99,4	99,5	91,6	91,6	88,4
C-konversio <sup>5</sup> , m-%	97,9	98,2	98,5	99,2	96,4	100,3	100,2	91,4	89,0	89,6
Massataseet (ulos/sisään)										
C-tase	0,98	0,98	0,99	1,02	1,00	1,01	1,01	1,00	0,98	1,01
O-tase	0,96	1,04	1,03	1,06	1,13	0,99	0,93	0,90	0,93	0,92

<sup>1</sup>) laskettu nopeutena tyhjässä reaktoriputkessa ja käyttämällä leijutuskaasujen tilavuusvirtaa, petilämpötilaa ja painetta laskennassa

<sup>2</sup>) laskettu kaasun tilavuusvirran, kaasuttimen kokonaistilavuuden ja keskilämpötilan ja paineen perusteella (freeboard)

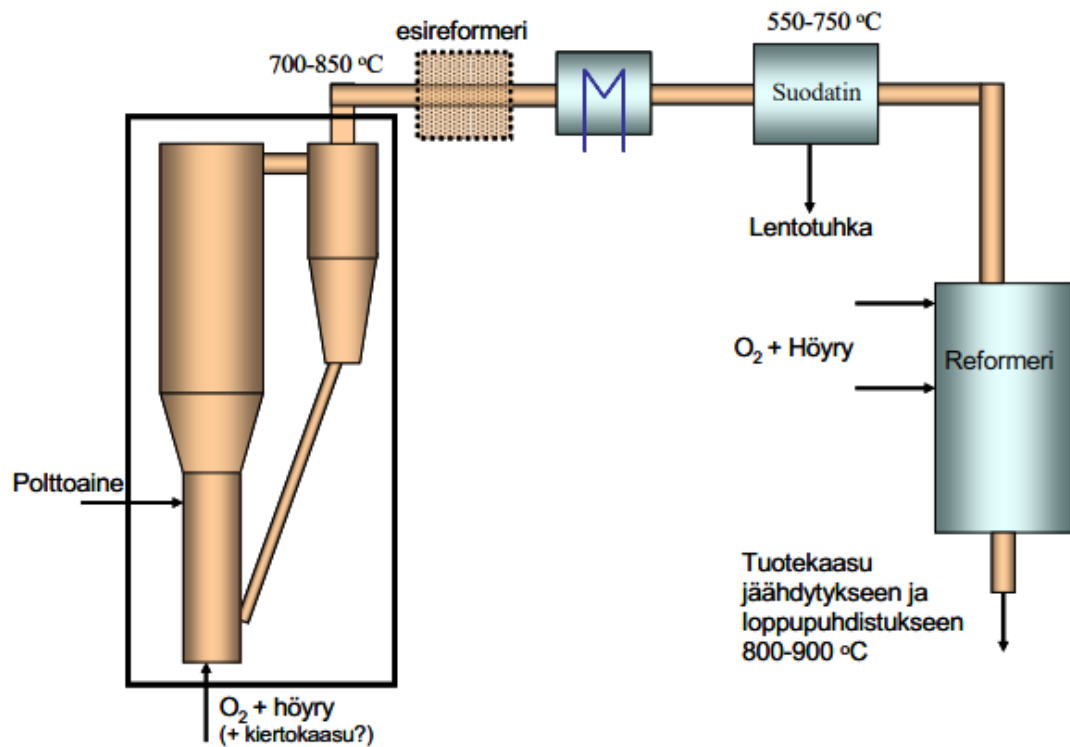
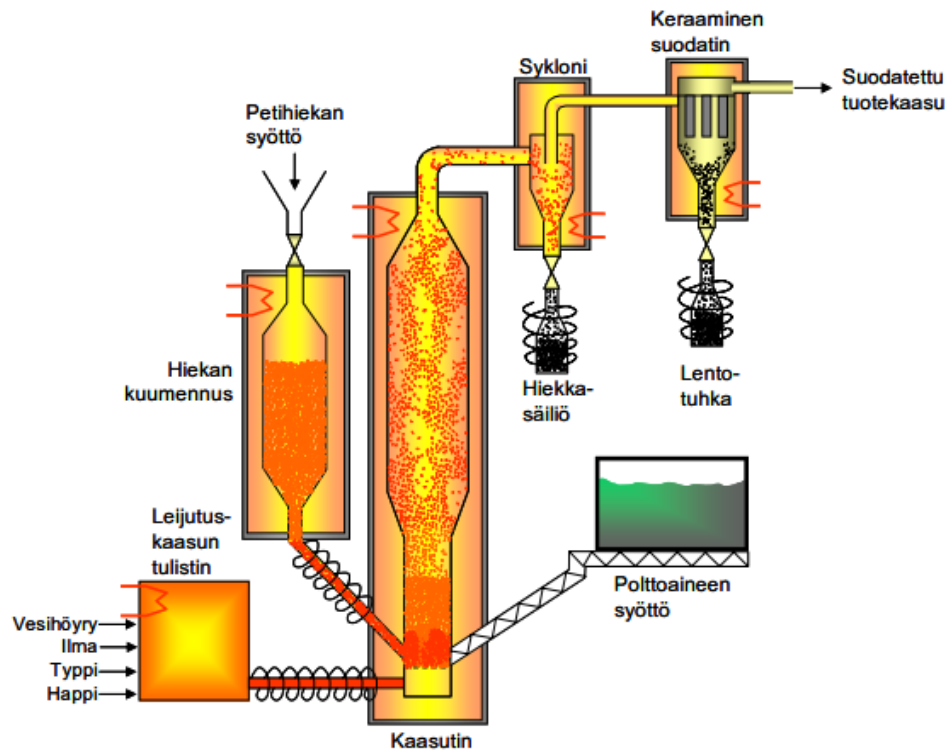
<sup>3</sup>) polttoainelinjaan, pohjaputkeen ja mittausyhteisiin puhalletun huuhtelutypen laimentava vaikutus on laskennallisesti poistettu

<sup>4</sup>) laskettu lentopölyjen ja petiin jäävän alkuainehiilen suhteena syötetyn polttoaineen alkuainehiilen massavirtaan

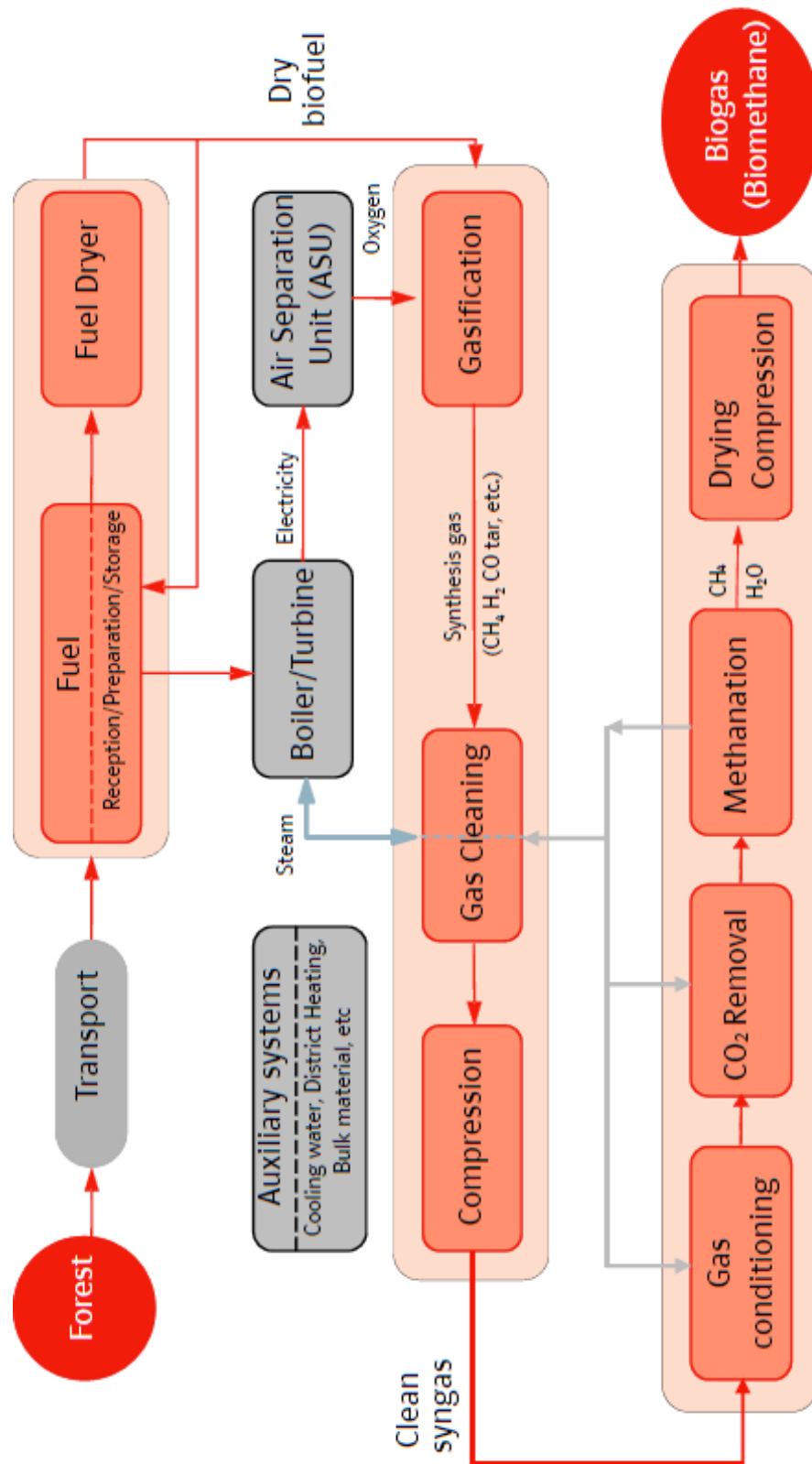
<sup>5</sup>) laskettu muodostuvien kaasujen ja tervan hiilisisällön perusteella

Lähde: E. Kurkela, P. Simell, P. McKeough, M. Kurkela. Synteesikaasun ja puhtaan polttoaasun valmistus. VTT Technical Research Centre of Finland, 2008. Liite A1.

**LIITE 4. VTT:n Synteesikaasun ja puhtaan polttokaasun tutkimus-hankkeessa käytetyn kaasuttimen rakenne ja prosessi.**

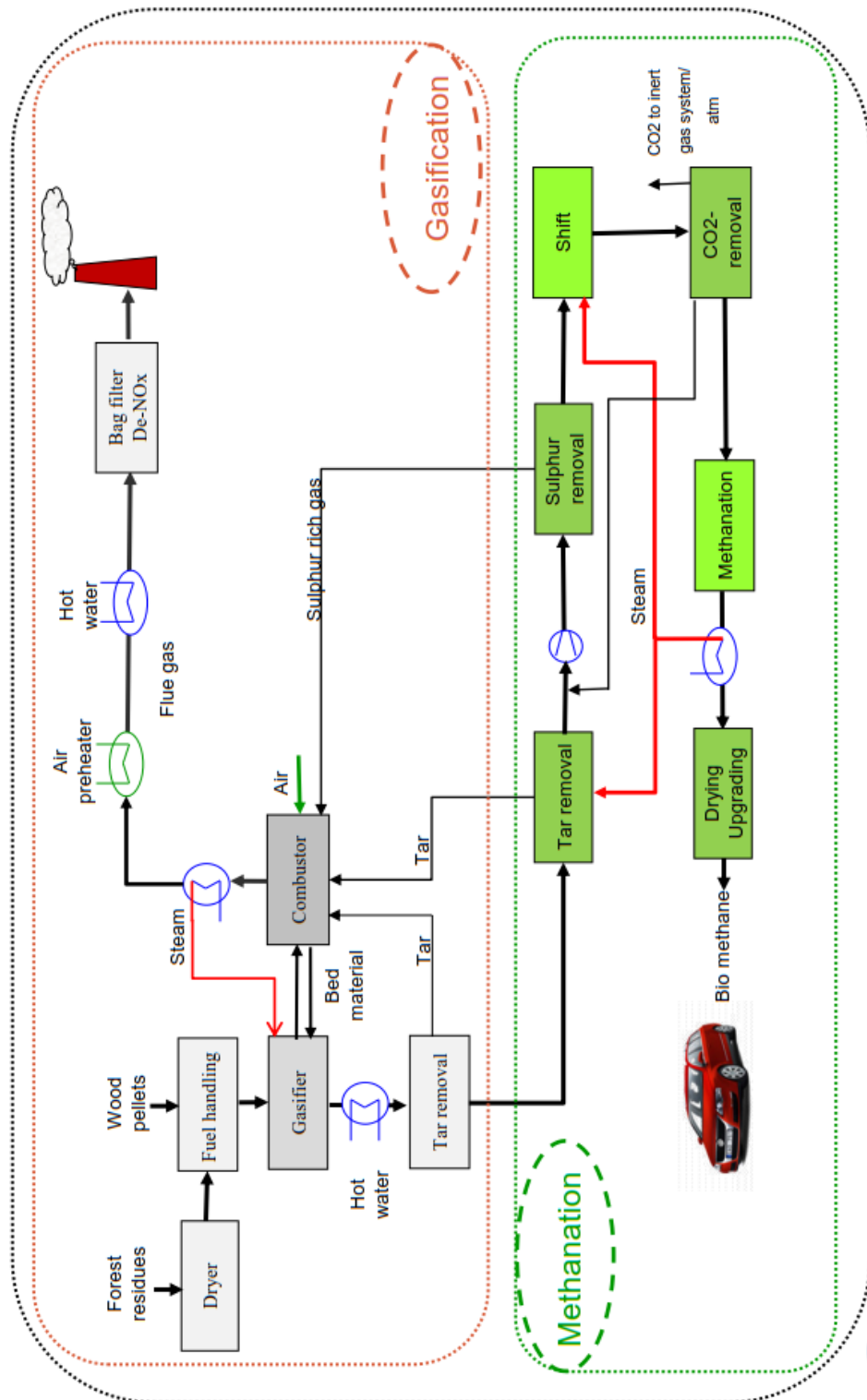


**LIITE 5. Biomass-to-Gas Bio2G –hankkeen biometaanin tuotannon prosessikaavio. [38]**



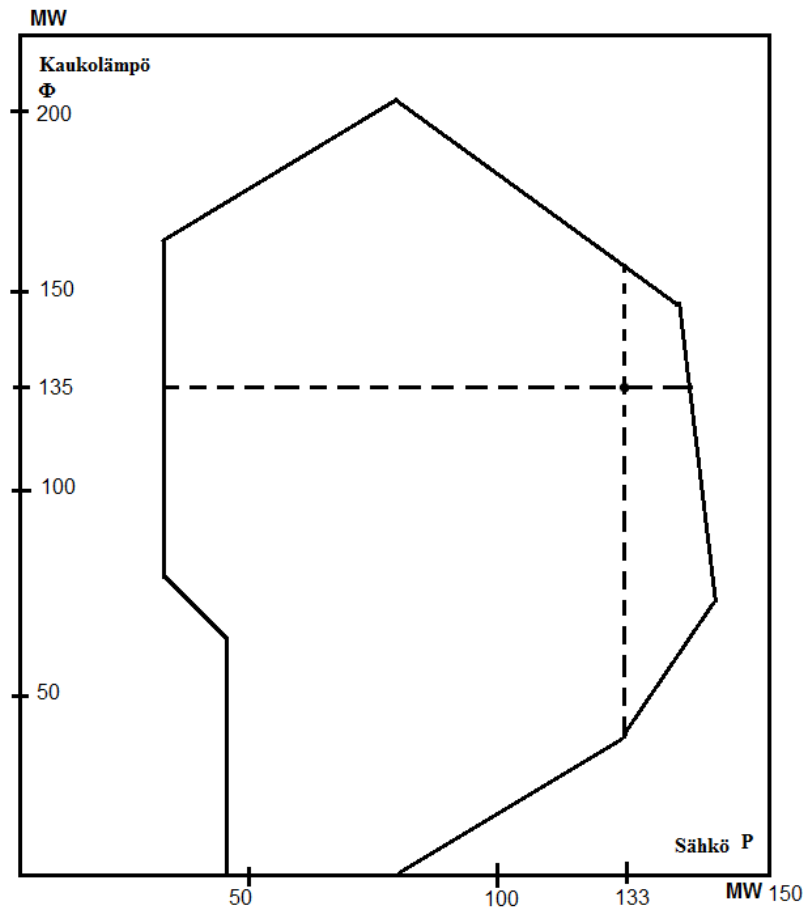
## LIITE 6. GoBiGas-hankkeen 2. vaiheen suunniteltu prosessikaavio. [20]

### Technical principles





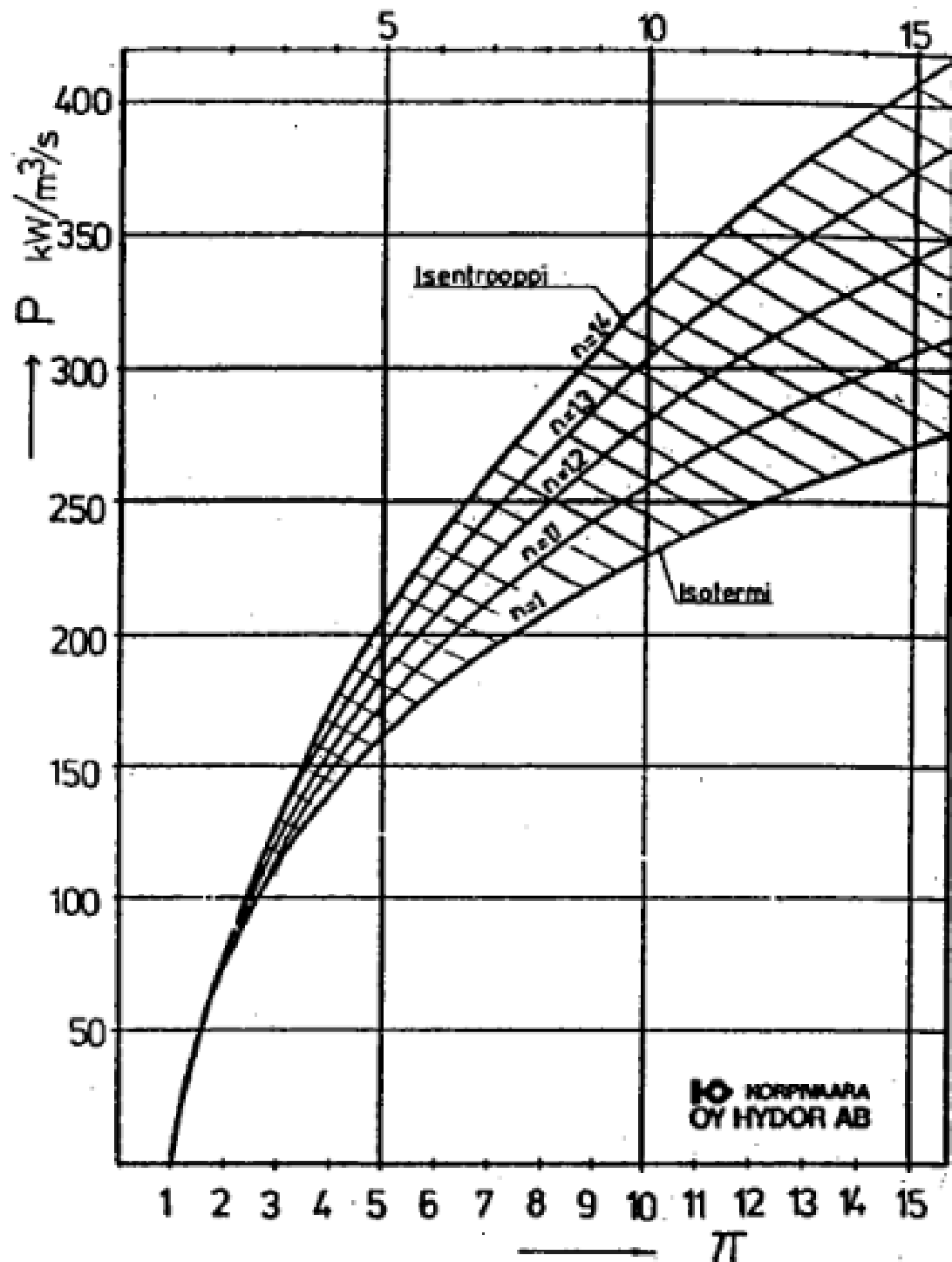
## LIITE 7. Lielahden kombivoimalaitoksen $\Phi$ P-karakteristika. [44 s.104]



Tilapisteen mahdolliset muutokset:

- 1) Vakio polttoaineteho, reduktiota lisäämällä lisää kaukolämpötehoa - P pienenee
- 2) Lisää polttoainetehoa jätelämpökattilaan ja reduktiota lisäämällä lisää kaukolämpötehoa – P vakio
- 3) Lisää polttoainetehoa jätelämpökattilaan – P ja  $\Phi$  kasvavat
- 4) Lisää polttoainetehoa kaasuturbiiniin – P ja  $\Phi$  kasvavat
- 5) Lisää polttoainetehoa jätelämpökattilaan lisäjähdytyksen kanssa TAI lisää polttoainetehoa kaasuturbiiniin ja lisäjähdytys – P kasvaa,  $\Phi$  vakio
- 6) Lisäjähdytys

LIITE 8. Kaasun puristustehontarve eri puristussuhteilla. [1]



Kuva 6. Puristustehontarve eri painesuhteilla puristuksen tapahtuessa isotermisesti ja isentrooppisesti.

## LIITE 9. Case 1: Säilörehusta liikennepolttoaineeksi -osion laskenta

Laskennan pohjana on käytetty seuraavia oletuksia:

- Kaikki biometaanin, joka tuotetaan, myydään tämänhetkiseen markkinahintaan 90€/MWh. Vuoden tuotannosta ei jää inventaarioon vuoden päätteeksi yhtään biometaanin. Omavaraisuusskenaariossa biometaanilla korvataan liikennebensiniä, jolloin sen ”myyntihinnaksi” ajatellaan liikennebensinin hinta 166€/MWh (1,5€/l)
- Tuotannossa tulevat operointikulut muodostuvat biometaanin myyntiin ja jalostukseen liittyvistä tehtävistä (skenaario 2). Huoltokulut jakautuvat koko laitoksen kesken molemmissa skenaarioissa, ja sisältyvät operointikuluihin. [45]
- Tuotantoon liittyvät muuttuvat kustannukset pysyvät vakiona laitoksen koko elinkaaren ajan, ts. kulut ajatellaan vuosittaisiksi keskiarvoiksi.
- Määtysjäännöksen arvoksi määritetään 0€, koska sille ei ole kehittynyt vakiintuneita markkinoita. Jäännös käytetään laitoksen syötenurmen viljelyssä. Skenaariossa 1 jäännöksen käsittelystä ei oleteta muodostuvan lisäkustannuksia. [47]
- Nurmen hankintakustannus on 8 snt/kg kuiva-ainetta. Hehtaarilta saatava nurmisato 6,5 tonnia kuiva-ainetta. Hehtaarin sadolla tuotetun biokaasun energiamääräksi oletetaan 20 MWh. [9 s.67, 28,33]
- Omavaraisuusskenaariossa nurmen hankintahinnaksi oletetaan 0€, koska nurmea kerätään tiloilla jo nyt, joten biokaasutuotanto ei tuota nurmen viljelyn suhteen lisäkuluja. Tuotettu biokaasu korvaa ostettua polttoöljyä (85 €/MWh) ja sähköä (120 €/MWh, sis. verot, siirto).

Laskennassa käytetyt laskukaavat:

Skenaario 1:

$$\text{Biokaasun tuotantohinta} = \frac{\text{Reaktori} + \text{CHP} - \text{yksikkö}}{\text{Tuotettu biokaasu}}$$

$$\text{Biometaanin tuotantohinta} = \frac{\text{Jalostusyksikkö} + \text{Jalostuksen energia}}{\text{Tuotettu biometaanin}}$$

$$\text{Nettosähkön hinta} = \frac{\text{Investointi} + \text{Operointi}}{\text{Nettosähkön määrä}}$$

$$\text{Takaisinmaksuaika} = \frac{\text{Investoinnin kokonaissuuruus}}{\text{Vuotuinen säästö}}$$

Skenaario 2:

$$\dot{V}_{biokaasu} = \frac{A_{pelto} E_{pelto}}{x_{CH_4} q_{CH_4} t}, [\dot{V}_{biokaasu}] = \frac{Nm^3}{h}$$

$$Biokaasun\ tuotantohinta = \frac{Investointikulut + Prosessienergia + Nurmi}{Tuotettu\ biokaasu}$$

$$Biomet.\ tuotantohinta = \frac{Biok.\ tuotantohinta + Operointi + Jalostus}{Tuotettu\ biometaani}$$

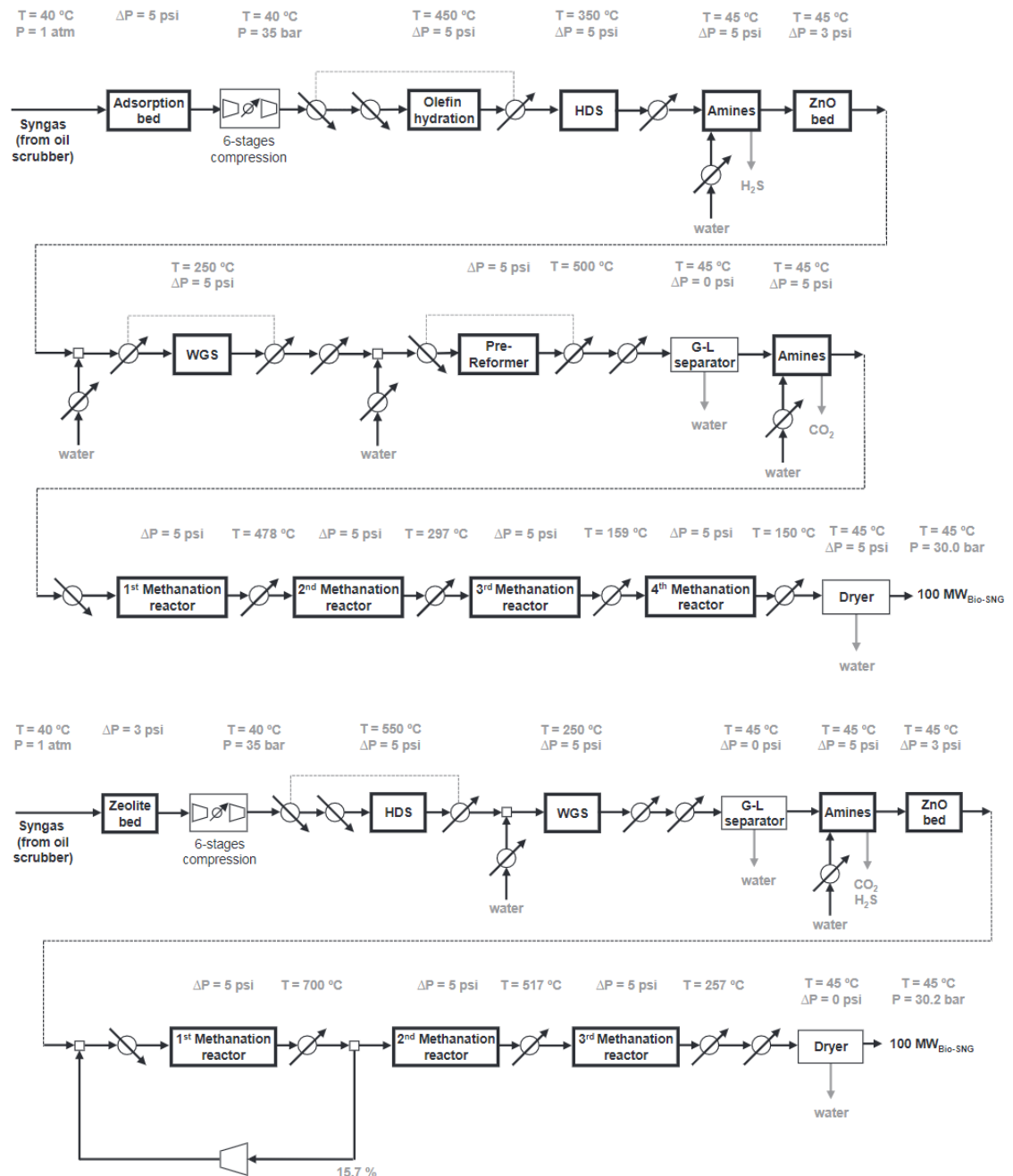
$$Vuotuinen\ nettotuotto = Tuotettu\ biometaani * Biomet.\ nettomyyntihinta$$

$$Takaisinmaksuaika = \frac{Investoinnin\ kokonaissuuruus}{Vuotuinen\ nettotuotto}$$

Prosessienergian käyttöön liittyvät laskelmat ja tarkastelun rajaus:

Skenaariossa 2 biometaania tuotetaan ilman sähkön- tai lämmöntuotantoa. Tällöin tarvittava prosessienergia on hankittava ulkopuolisesta energialähteestä. Jalostukseen tarvittava sähköenergia hankitaan markkinasähkönä kokonaishintaan, sisältäen siirron, 9snt/kWh (90€/MWh) ja tarvittava lämpö tuotetaan hake/kaasukattilassa. Sähkön siirtohinta määräytyy pien- tai keskisuuren teollisuuskäytön tasolle 3-5snt/kWh riippuen laitoksen sijainnista sekä vuosittaisesta kulutuksesta [11]. Hakekattilan nimellisteho on 1MW, hyötysuhde 0,90, investointi 150 000€ ja hakkeen hankintahinta vuoden 2016 mukaan keskimäärin 21€/MWh. Hake- ja kaasukattila oletetaan hinnan ja hyötysuhteen osalta identtisiksi. Operointikuluksi on budjetoitu vuosittain 100 000€, joka kattaa laitoksella tarvittavan työvoiman sekä muut huoltokustannukset. Prosessienergian kulutuksen pohjana on käytetty suomalaisia jo olemassa olevia laitoksia, joissa sähkön- ja lämmönkulutuksen suhde on 1:3 kokonaisprosessienergiasta [28,33,45].

## LIITE 10. Case 2: Synteettisen biometaanin tuotanto Suomessa - osion laskenta



**Kuva 10-1.** Suunniteltu GoBiGas-prosessi (ylempi) ja tutkimuksessa [19] esitetty vaihtoehtoinen prosessi.

Hakkeen hinnan määrittämiseen käytetyt arvot [54]:

Kosteus-%	$q_{LHV}$ [MJ/kg]	Irtotiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	Hinta hankintakaupassa [€/m <sup>3</sup> ]
50	19	300	19,95

Mustalipeän kaasutuksen laskenta:

Oletukset ja lähtötiedot:

1. Täysi CO-konversio metaaniksi
2. Synteesikaasu->Biometaani konversio 90% (% HHV). Konversio 6% heikompi kuin puubiomassan kaasutuksen tapauksessa, koska mustalipeän kaasutuksessa kaasuttimessa syntyy enemmän hiilidioksidia sekä shift-reaktorissa H<sub>2</sub>-pitoisuuden nosto tuottaa hiilidioksidia. Synteesikaasun metaanipitoisuus kaasuttimen jälkeen on myös huomattavasti, noin 10%, pienempi.
3. Terveiden kaasuuntuminen näkyy synteesikaasun korkeampana H<sub>2</sub>-pitoisuutena
4. Kaasuttimelle tuleva 500 t BLS/d jakautuu tasaisesti ajan suhteen, eikä se vaikuta soodakattilan toimintaan häiritsevästi.
5. Kaasuttimen vuosittainen käyttöaika 6000 h, johtuen revisiotarpeen kaksinkertaistuksesta. Kaasuttimen lämpöpintojen vuorauksen kestävyys on noin 6kk.
6. Energiatarkastelussa ei huomioida metanointiprosessin tarvitsemaa tai mustalipeän käsittelyn tarvitsemaa energiaa

Lasketut arvot:

$$\dot{m}_{BLS} = 5,787 \frac{kg}{s}$$

$$q_{s,g} = 12,75y_{H_2} + 12,63y_{CO} + 39,82y_{CH_4} + 25,105y_{H_2S} = 10,91 \frac{MJ}{Nm^3}$$

$$CGE = \frac{q_{s,g}V_g}{q_{s,f}} = 0,96 \rightarrow V_g = 1,2174 \frac{Nm^3}{kg_{BLS}}$$

$$P_{HHV,syngas} = 76,889 MW$$

Synteesikaasun luovuttama lämpöteho:

$$\Phi = \dot{N}_{sk} \sum_{i=1}^n [H_{mt,i}(T_2) - H_{mt,i}(T_1)], \dot{N}_{sk} = \left[ \frac{kmol}{s} \right], \Phi = [MW]$$

Synteesikaasun luovuttama teho [MW], kun  $T_2 = 1000 \text{ °C} \rightarrow T_1 = 40 \text{ °C}$ :

Synteesikaasun luovuttama lämpöteho:				
T1	1223,15	K	Tryti	10,16918856
T2	313,15	K	Tryti	2,60350848
		Hmt T2	Hmt T1	xi Hmt T2 - Hmt T1
CO	0,381	30,94	0,44	11,6205
CO2	0,1915	48,62	0,5809	9,19948765
H2	0,3919	29,08	0,43	11,227935
H2S	0,0191	40,99	0,5224	0,77293116
CH4	0,0135	59,1319	0,5627	0,7906842
N2	0,003	30,58	0,4296	0,0904512
YHT	1			33,70198921
SK luovuttama teho:				10,595

Kaasutukseen tarvittava höyry:

$$\dot{m}_{\text{höyry}} = 0,6\dot{m}_{\text{BLS}} = 3,4722 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

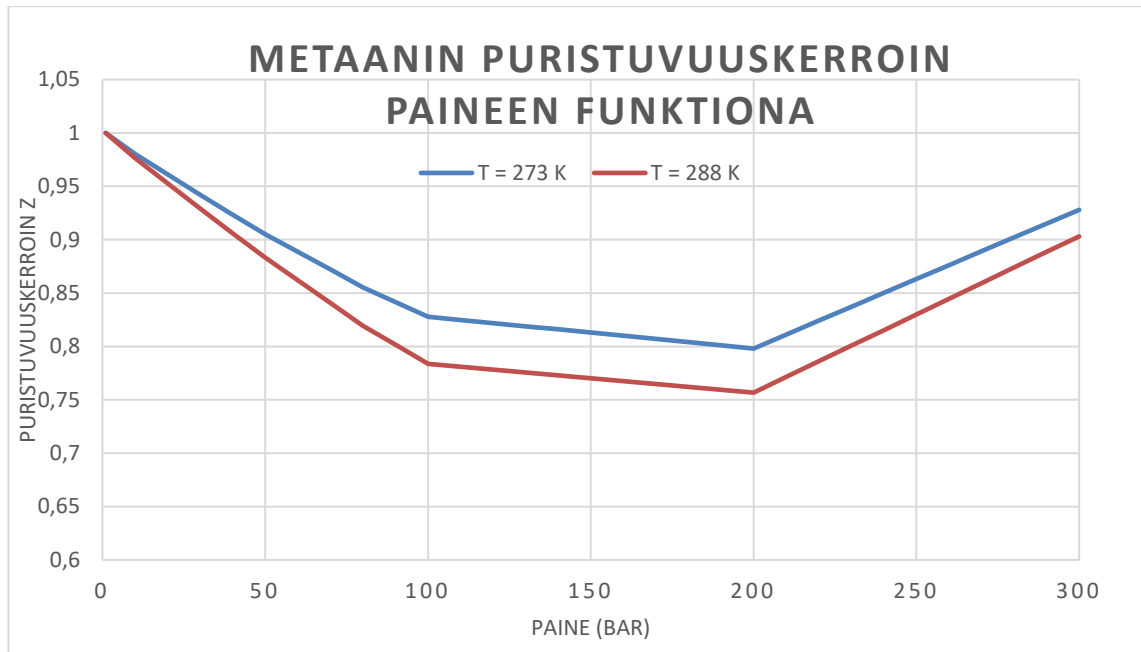
Tarvittava energia, kun syöttöveden lähtötila  $(p, T) = (7 \text{ bar}, 150 \text{ °C}) \rightarrow (30 \text{ bar}, 250 \text{ °C})$ :

$$h_1(7 \text{ bar}, 150 \text{ °C}) = 632,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \text{ paineistetun veden entalpia}$$

$$h_2(30 \text{ bar}, 250 \text{ °C}) = 2824,56 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \text{ tulistetun höyryn entalpia}$$

$$P_{\text{höyry}} = \dot{m}_{\text{höyry}}(h_2 - h_1) = 7,61 \text{ MW}$$

# LIITE 11. Case 3: Biometaanin varastointi- ja kuljetusteknologioiden vaikutus käyttöön -osion laskenta



**Kuva 10.1.** Metaanin puristuvuuskerroin paineen funktiona. [57]

Case 3:ssa käytetyt laskukaavat:

$$P_{komp.aks} = \frac{np_{atm}\dot{V}\ln(\pi)}{\eta_{isot.}}$$

jossa  $P_{komp.aks}$  on kompressorin tarvitsema akseliteho,  $n$  kompressorivyöhykkeiden lukumäärä,  $p_{atm}$  biometaanin alkupaine,  $\dot{V}$  biometaanin tilavuusvirta,  $\pi$  painesuhde yhden kompressorivyöhykkeen yli (vakio) ja  $\eta_{isot.}$  kompressorin isoterminen hyötysuhde. Tietyn kaasun tilavuuden  $V$  puristukseen tarvittu työ  $W$  haluttuun loppupaineeseen voidaan määrittää

$$W_{komp.aks} = \frac{np_{atm}V\ln(\pi)}{\eta_{isot.}}$$

$[W] = [J]$ . Arvo voidaan muuntaa kilowattitunneiksi kertoimella  $1 J = 2,77 \cdot 10^{-7} kWh$ .

Kaasusäiliöön varastoidun biometaanin energiamäärä

$$E_{säiliö} = V_{CH_4}x_{CH_4}q_{CH_4},$$

jossa  $V_{CH_4}$  on varastoitu biometaanin tilavuus NTP-olosuhteissa,  $x_{CH_4}$  kaasun metaanipitoisuus ja metaanin lämpöarvo  $q_{CH_4} = 10 \frac{kWh}{m^3}$ .  $[E_{säiliö}] = kWh$ .



Kaasun puristuvuuskerroin huomioidaan ideaalikaasun tilanyhtälössä

$$pV = nZRT,$$

jossa  $nR$  on vakio. Tällöin yhtälö voidaan myös kirjoittaa muodossa

$$\frac{p_1 V_1}{Z_1 T_1} = \frac{p_2 V_2}{Z_2 T_2}.$$

Korkeissa paineissa ja/tai lämpötiloissa huomioitava puristuvuuskerroin kuvaa kaasumolekyylien välisiä vuorovaikutusvoimia. NTP-kaasulle  $Z = 1$ .

LBG:n siirtoon liittyvät oletukset ja lähtöarvot:

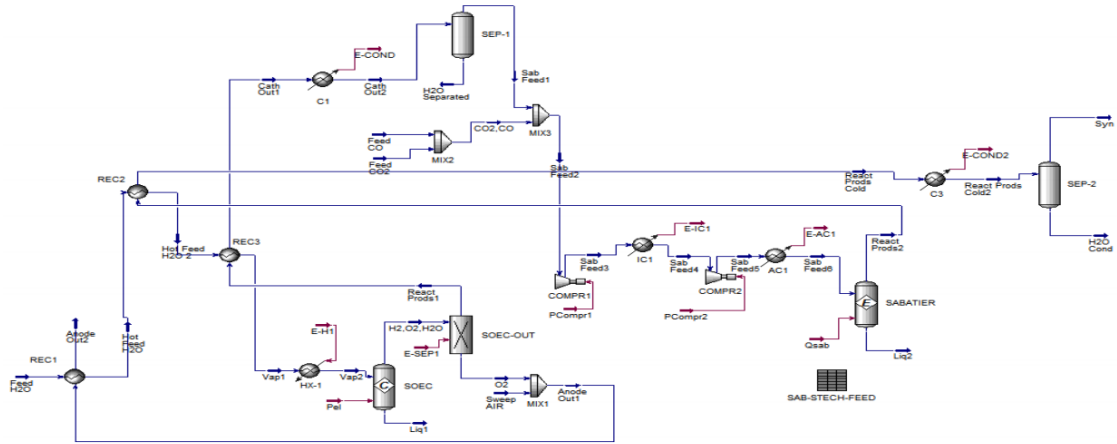
1. Kuljetuksen diesel-kulutus LBG 0,46 l/km, CBG 0,40 l/km [25]
2. LBG:n tuotanto 0,8 kWh/Nm<sup>3</sup> [25], CBG 0,32 kWh/Nm<sup>3</sup>
3. LBG pumppausteho terminaalissa 0,055 kWh/Nm<sup>3</sup> [25], CBG 0,15 kWh/Nm<sup>3</sup>
4. LBG-trailerin kapasiteetti 27867 Nm<sup>3</sup> (19730 kg), CBG 5160 Nm<sup>3</sup> [25]
5. Dieselin lämpöarvo 10,29 kWh/l

Energiakulutus kokonaisuudessaan [25]:

$$E = E_{tuotanto} + E_{terminaali} + \left( \frac{q_{DieselS}}{V_{traileri}} * kulutus \right),$$

jonka yksikkö  $[E] = \frac{kWh}{Nm^3}$  biometaanina.

## LIITE 12. Case 4: Biometaani uusiutuvista lähteistä sekä energian varastointivälineenä -osion laskenta



**Kuva 12-1.** Tutkimuksessa [2] kuvattu Sabatier-PtG-prosessi.

Laskennan kaavat käyttäen pohjana osiossa esitettyä 14396,39kg vuosittaista vedyntuotantoa:

$$\eta_{Sab} = \frac{Q_{Syn}}{Q_{H_2}} = \frac{m_{Syn} LHV_{Syn}}{m_{H_2} LHV_{H_2}} \rightarrow m_{Syn} = \frac{m_{H_2} LHV_{H_2}}{LHV_{Syn}} \eta_{Sab}$$

$$\rho_{Syn} = \rho_{CH_4} v_{CH_4} + \rho_{H_2} v_{H_2} + \rho_{CO_2} v_{CO_2}$$

$$\rightarrow Q_{Syn} = 34 \frac{MJ}{kg} m_{Syn} = 395,7688 MWh, \rho_{Syn} = 0,847007$$

$$\rightarrow V_{Syn} = 49474,12 Nm^3, V_{CH_4} = 40568,78 Nm^3, Q_{CH_4} = 385,4034 MWh$$

Jalostus 32 kWh/Nm<sup>3</sup> → Jalostus 1321,95 € sähkön hinnalla 8,35 snt/kWh tai 3,43 €/MWh biometaania.

$$Tuotetun synteetikaasun hinta = \frac{Tuotetun vedyn kok. hinta}{Synteetikaasun energia}$$

$$Tuotetun biometaanin hinta = Synteetikaasun hinta + Jalostuskustannus$$